



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL DE FI DE CARRERA

TÍTOL DEL TFC: Introducción de las escorias, procedentes de la incineración, en las capas granulares de los firmes aeroportuarios.

TITULACIÓN: Enginyeria Tècnica Aeronàutica, especialitat Aeronavegació

AUTORA: Laura Garau Bezzina

DIRECTOR: Francisco Zarate Araiza

CODIRECTOR: Aina Canaleta Safont

DATA: 15 de juliol de 2011

Título: Introducción de las escorias procedentes de la incineración, en las capas granulares de los firmes aeroportuarios.

Autor: Laura Garau Bezzina

Director: Francisco Zarate Araiza

Codirector: Aina Canaleta Safont

Data: 15 de juliol de 2011

Resumen

El objeto de este trabajo, es determinar la posibilidad de la introducción de las escorias en la subbase en el paquete de los firmes aeroportuarios, aprovechando de esta manera un residuo molesto por su difícil aplicación y, a la vez, abaratando los costes de construcción de las obras.

Para la realización de este estudio se ha tomado como referencia el aeropuerto de Palma de Mallorca. Una vez caracterizado el terreno natural, donde se pretende construir el aeropuerto, y tomando las predicciones del tráfico aéreo para este aeropuerto, se ha dimensionado el paquete de firme estructural (flexible y rígido) con los materiales convencionales para su construcción, introduciendo a continuación la variante de sustituir la subbase granular (zahorras artificiales) por escorias.

El método empleado se basa en el cálculo de los módulos elásticos de las diferentes capas que conforman el paquete de firme. Para el cálculo de los mismos se ha realizado un ensayo edométrico para las escorias y un ensayo con el pulso de ultrasonido en el caso de las zahorras. Los módulos elásticos de las otras capas (rodadura, firme y explanada), así como sus espesores se han tomado idénticos en los dos casos.

Se utiliza el programa GID y Calsef para el cálculo tensional evaluando la tensión real para nuestra aeronave tipo, comparándolas con las tensiones admisibles de cada material, llegando así a establecer los coeficientes de seguridad para cada una de las capas.

A la vista de los resultados obtenidos y desde el punto de vista puramente estructural, podemos concluir que el comportamiento resistente del paquete de firme con escorias es aceptable, incluso mejor que con ciertos materiales convencionales usados habitualmente.

Title: Introduction of the slag from incineration, in the granular layers of the airport pavements.

Author: Laura Garau Bezzina

Director: Francisco Zarate

Codirector: Aina Canaleta

Date: June, 15th 2011

Overview

The purpose of this study is to determine the possibility to introduce the slag on the deepest layers in the package of airport pavements, so taking advantage of an annoying waste. Further the costs of building would be cheapened.

To perform this study we have taken as a reference the airport of Palma de Mallorca. Once characterized the natural land, where is supposed to build the airport and studying the predictions of air traffic for this airport, we have dimensioned the structural package (flexible and rigid) with conventional materials for its construction. Then we have introduced the variable to replace the granular arid from bottom layer (artificial ballast) for slag.

The method used is based on the computation of the elastic module of different layers of the final package. For their calculation has been made oedometer test to the slag and a pulse of ultrasound test in the case of ballast. The elastic module of the other layers (rolling, firm and esplanade) and their thicknesses are considered identical in both cases.

GID and Calsef are the software used for the computation and for the evaluation of the real stress for our type aircraft. Just like that we'll compare real stress with the allowable stress of each material, so reaching the safety factors for each layer.

Analyzing the results from the structural viewpoint, we can conclude that the resistant behaviour of the package with slag is even better than conventional materials commonly used.

Agrair la confiança i als ànims al meu Pilar incondicional.
Gràcies per estar sempre al meu costat.
I al meu pare per la seva paciència.

Per altra banda, també he d'agrair l'ajuda i la seva preocupació
al meu tutor Francisco Zarate
com a la cotutora Aina Canaleta.

Gràcies a tots.

ÍNDICE

Objetivos	10
Introducción	10
I CAPÍTULO. Evaluación del tráfico y elección de la aeronave tipo	
I.1 Determinación de las salidas equivalente de la aeronave tipo	16
II CAPÍTULO. Caracterización del paquete de firme	
II.1 Calculo de espesores del pavimento flexible, método F.A.A.....	18
II.2 Calculo de espesores de los pavimentos rígidos	20
II.2.1 Determinación de los espesores equivalentes debido a la aeronave tipo	24
II.3 Calculo de la resistencia en los pavimentos.....	26
II.3.1 Concepto de PCN	26
II.3.2 Concepto de ACN	27
II.3.3 Método ACN-PCN	28
II.3.4 ACN vs PCN en el A320.....	28
II.3.5 Análisis de pavimentos en el Aeropuerto de Palma de Mallorca ..	29
II.3.6 Conclusiones	30
II.4 Elección del material cumpliendo la FAA para el aeropuerto de Palma de Mallorca	30
II.4.1 Caracterización de nuestro suelo natural	30
II.4.2 Caracterización del FIRME y SUBBASE	33
III CAPÍTULO. Sustitución de las zahorras artificiales por escorias procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos en diferentes capas de firmes aeroportuarios	
III.1 Antecedentes	36
III.2 Introducción.....	39
III.3 Marco legal.....	40
III.4 Proceso de obtención de las escorias.....	43
III.5 Caracterización física y mecánicas de las escorias	45
IV CAPITULO. Comprobación de la idoneidad de las escorias en los firmes aeroportuarios.	
IV.1 Análisis estructural del problema	49
IV.2 Ensayo para la obtención de los módulos elásticos.....	52
IV.2.1 Introducción.....	52
IV.2.2 Preparación de la muestra	52
IV.2.3 Pulso de ultrasonido.....	57
IV.2.4 Resultados	58
IV.2.5 Ensayo edométrico de las escorias	59
IV.3 Superficie de repartición de cargas.....	62
IV.3.1 Clasificación de pavimento por su resistencia. Carga por rueda simple equivalente-Núm. L.C.N.....	62

IV.3.2	Área de contacto	63
IV.3.3	Comprobación del los espesores con el método L.C.N.....	65
V	CAPÍTULO. Comprobación de las secciones con el método de elementos finitos	
V.1	Pre Proceso paquete convencional.....	67
V.1.1	Superficies y volúmenes	67
V.1.2	Malla	68
V.1.3	Condiciones de contorno y propiedades mecánicas.....	69
V.1.3.1	Asignación de desplazamientos fijos	69
V.1.3.2	Aplicación de cargas	69
V.1.3.3	Asignación material	70
V.2	Post Proceso paquete convencional	71
V.2.1	Deformación	71
V.2.2	Desplazamientos	72
V.2.2.1	Desplazamiento en eje X	72
V.2.2.2	Desplazamiento en eje Y	72
V.2.2.3	Desplazamiento total.....	72
V.2.3	Tensiones	73
V.2.3.1	Tensiones principales capa rodadura	73
V.2.3.2	Tensiones principales capa firme.....	74
V.2.3.3	Tensiones principales capa subbase	74
V.2.3.4	Tensiones principales en la explanada	74
V.3	Post Proceso Escorias	76
V.3.1	Deformación	76
V.3.2	Desplazamientos	77
V.3.2.1	Desplazamiento en eje X	77
V.3.2.2	Desplazamiento en eje Y	77
V.3.2.3	Desplazamiento total.....	77
V.3.3	Tensiones	78
V.3.3.1	Tensiones principales capa de Rodadura:	78
V.3.3.2	Tensiones principales capa de Firme:.....	78
V.3.3.3	Tensiones principales capa de Subbase:.....	79
V.3.3.4	Tensiones principales en la Explanada:.....	79
V.3.4	Análisis de los resultados	80
VI	CAPÍTULO. Presupuesto	82
VII	CAPÍTULO. Conclusiones	83

ANEXOS	87
ANEXO 0. Glosario de terminos	87
ANEXO A. Emplazamiento del aeropuerto de Palma de Mallorca.....	88
A.1 Características físicas de las pistas:	88
A.2 Características físicas de las calles de rodaje:	88
A.3 Características físicas de la plataforma:	89
ANEXO B. Método CBR	92
ANEXO C: Dimensionamiento de la aeronave característica	93
ANEXO D: Resistencia de los pavimentos	94
D.1 Resistencia de pavimentos:.....	95
ANEXO E. Tabla de conversión de los tamices UNE vs ASTM.....	97
ANEXO F. Ensayos del suelo natural	98
F.1. Ensayo Proctor Modificado del terreno natural	99
ANEXO G: Construcción y normativa de la SUBASE	100
G.1 Construcción de la capa de subbase:.....	100
G.2 Normativa	100
ANEXO H. Ensayo de la subbase	101
H.1 Proctor Modificado de las zahorras	102
I.1. Proctor Modificado de las escorias.....	106
I.2 Comentarios sobre el ensayo realizado a las escorias	109
J. Comprobación de las secciones con el modelo numérico (3D)	110
J.1 Pre Proceso:.....	110
J.1.1 Diseño estructural, superficies y volúmenes:	110
J.1.2 Condiciones de contorno y propiedades mecánicas:	110
J.2.1 Asignación de desplazamientos fijos	111
J.2.2 Aplicación de las cargas	111
J.3 Malla	112
ANEXO K: Ensayo Edométrico.....	113
ANEXO L. Ficha mercado CE.....	115
ANEXO M. Caracterización física y mecánicas de las escorias	116
ANEXO N : Fotos de la empresa concesionaria TIRME S.A	118

ÍNDICE DE FIGURAS

- Fig 1.1.** Evolución aeronaves anuales según el Plan Director
- Fig 1.2.** Curvas calculo espesores en pavimentos flexibles
- Fig 2.1.** Modelo tipo de los pavimentos flexibles
- Fig 2.2.** Espesores mínimos según la normativa
- Fig 2.4.** Modelo estándar para pavimentos rígidos
- Fig 2.5.** Obtención coeficiente de balasto terreno natural
- Fig 2.6.** Curva calculo coeficiente de balasto según espesor elegido
- Fig 2.7.** Calculo espesor losa hormigón
- Fig 2.8.** Espesores pavimento rígido
- Fig 2.8.** Márgenes de seguridad
- Fig 2.10.** Espesores estabilizados pavimentos flexibles
- Fig 3.1** Substitución capa zahorras por escorias
- Fig 4.1.** Tamización de las escorias
- Fig 4.2.** Zahorras ya tamizadas
- Fig 4.3.** Material + Agua
- Fig 4.4** Proctor zahorras
- Fig 4.5** Proctor escoria
- Fig 4.6.** Proctor
- Fig 4.7.** Pulso de ultrasonido en la muestra de escorias
- Fig 4.8.** Material sometido a una carga de compresión
- Fig 4.9.** Edómetro
- Fig 4.10.** Muestra ensayada en un edómetro
- Fig 4.11.** Cálculo del L.C.N según la carga por rueda simple
- Fig 4.12.** Calculo área de contacto gráficamente
- Fig 4.13** Espesor total del pavimento según el método L.C.N
- Fig 5.1.** Geometría stand de estacionamiento aeronave tipo, A320
- Fig 5.2.** Malla
- Fig 5.3.** Superficies restringidas
- Fig 5.4.** Líneas de aplicación de las cargas
- Fig 5.5.** Deformación total
- Fig 5.6.** Deformación con sus desplazamientos asociados
- Fig 5.7.** Tensiones principales de compresión y tracción en la capa de firme
- Fig 5.8.** Tensiones principales Rodadura
- Fig 5.10.** Tensiones principales Subbase
- Fig 5.11.** Tensiones principales en la Explanada
- Fig 5.12.** Vectores de tensiones
- Fig 5.13.** Deformación Escorias
- Fig 5.14.** Deformación con el desplazamiento total (Escorias)
- Fig 5.15.** Desplazamiento en eje X (Escorias)
- Fig 5.16.** Desplazamiento en eje Y (Escorias)
- Fig 5.17.** Desplazamiento total (Escorias)
- Fig 5.18.** Tensiones principales en Rodadura (Escorias)
- Fig 5.19.** Tensiones principales en el Firme (Escorias)
- Fig 5.20.** Tensiones principales en la Subbase (Escorias)
- Fig 5.21.** Tensiones principales en la Explanada (Escorias)

ÍNDICE DE TABLAS

- Taula 1.1.** Numero de despegues realizados para cada aeronave
- Taula 1.2.** Espesores recomendados según la F.A.A.
- Taula 1.3.** Calculo de las salidas equivalentes para la aeronave tipo
- Taula 2.1.** Espesores necesarios para la rodadura
- Taula 2.2.** Tabla resumen espesores totales paquete flexible
- Taula 2.3.** Resumen características pavimento rígido
- Taula 2.4.** Clasificación según las características del terreno de fundación
- Taula 2.5.** Tamización según la F.A.A para categorizar un terreno natural
- Taula 2.6.** Espesores aplicando el factor de equivalencia
- Taula 3.1.** Composición granulométrica de suelos estables Tipo I
- Taula 4.1.** Paquete estructural Flexible
- Taula 4.2.** Paquete estructural Rígido
- Tabla 4.3.** Datos de la muestra ensayada en el edómetro
- Tabla 5.1.** Tensiones reales y tensiones admisibles para cada material
- Tabla 5.2** Coeficientes de seguridad obtenidos

Objetivos

El objeto de este trabajo, es dar cumplimiento al TFC, prescrito académicamente con la ayuda del tutor Francisco Zarate, en la Escola d'Enginyeria de Telecomunicacions y Aeroespacial de Castelldefels. (EETAC).

Los datos de los ensayos que figuran a continuación en relación a las escorias procedentes del proceso de incineración de residuos urbanos son totalmente fiables. Han sido extraídos de muestras reales obtenidas en la planta de tratamiento de escorias de Son Reus, facilitadas por TIRME S.A., la empresa concesionaria del Consell de Mallorca para la gestión integral de los residuos urbanos en Mallorca y realizados por laboratorios certificados como son LBC (Laboratorio Balear para la Calidad SL), Applus Norcontrol Laboratori de Rubí, LGAI Technological Center S.A. (Applus).

Las características de los suelos del terreno natural escogido, corresponden a suelos de similar naturaleza en las proximidades de la zona del aeropuerto de Palma de Mallorca, por la imposibilidad real de sacar muestras in situ de los mismos, por evidentes razones de accesibilidad y seguridad.

Introducción

El objetivo del trabajo expuesto a continuación recae en la pavimentación del aeropuerto de Palma de Mallorca.

El aeropuerto de Palma de Mallorca se encuentra a 8km al Este de la ciudad de Palma. La superficie aproximada del aeropuerto es **de 675,8 hectáreas**.

Sus coordenadas son:

Latitud: 39°33'06" Norte

Longitud: 002°44'20" Este

Elevación: 9.8 m.

Clasificación del aeropuerto según el Plan Director del aeropuerto de Palma de Mallorca:

Clase: Internacional

Categoría OACI: 4-E

Categoría Administrativa: Aeropuerto de clase A

Código IATA: PMI

Código OACI: LEPA

Horario servicio: H-24

Los pavimentos tienen por misión repartir las cargas originadas por las ruedas de los aviones en superficies tales, que la carga unitaria en los terrenos no llegue a producir su rotura.

Constan generalmente de cuatro partes, con misiones diferentes:

- Capa de rodadura
- Firme
- Subbase
- Explanada

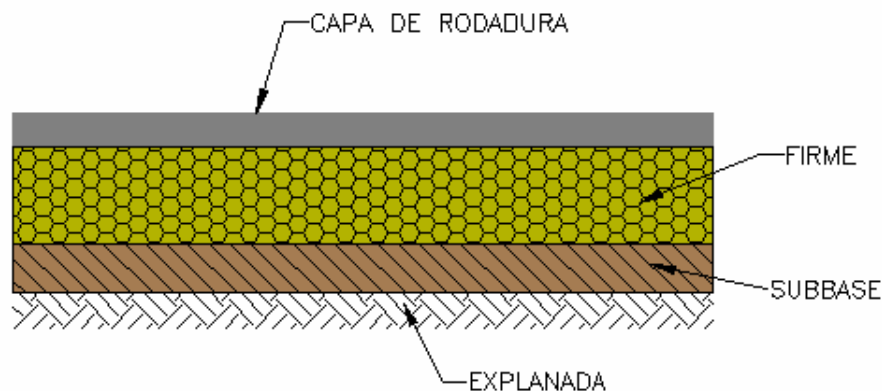


Fig. 1.1 Capas estándares

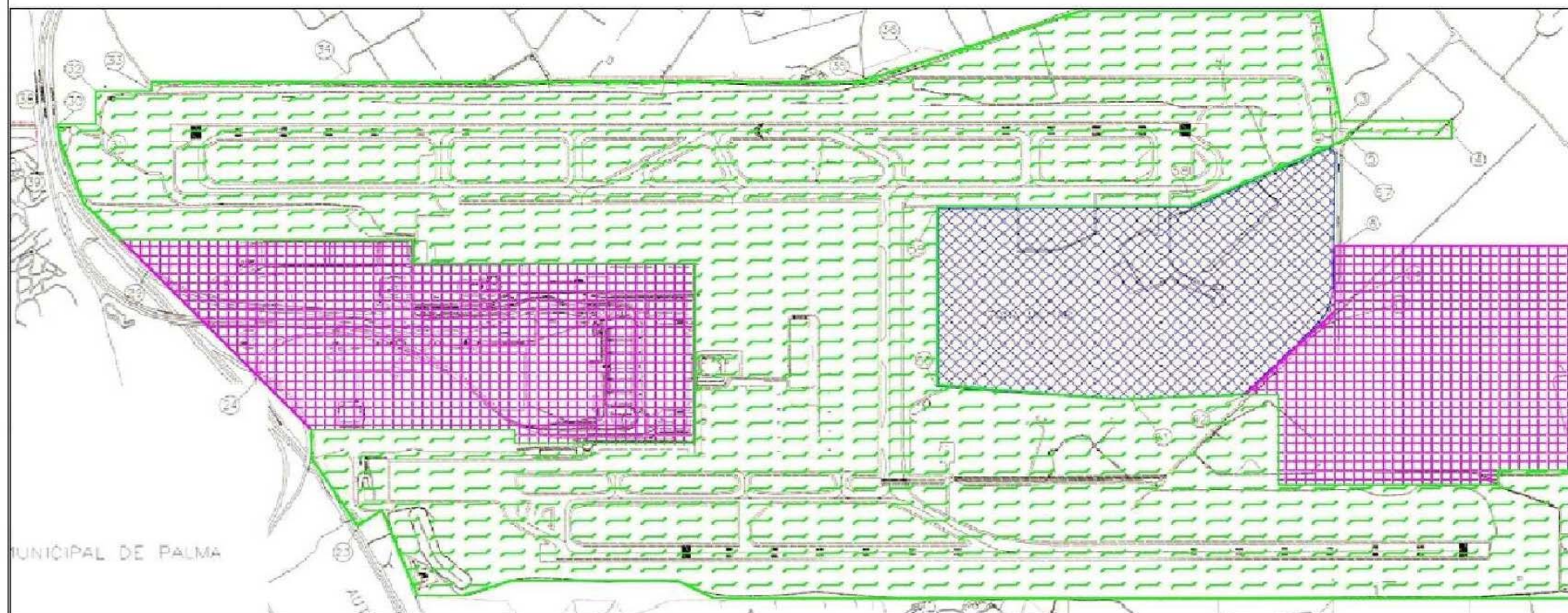
Sobre la capa de rodadura, se apoya directamente la rueda, permitiendo una rasante perfecta para cumplir unas buenas condiciones para la circulación de las ruedas.

El firme, tiene una función resistente. Debe ser perfectamente estable y duradero teniendo por misión repartir las cargas sobre la tercera capa.

El cimiento, a su vez, reparte todavía más las cargas hasta conseguir que las tensiones sobre el terreno natural sean admisibles.

Los pavimentos del aeropuerto de Palma de Mallorca están divididos en dos grandes tipos, flexibles y rígidos, como se ve en el Plano 1.0.

Generalmente, el pavimento de las plataformas está formado por material rígido, ya que la aeronave permanece parada mayor tiempo; mientras que en pistas y calles de rodaje, el material es flexible ya que al producirse un movimiento continuo y más agresivo, el pavimento necesita absorber constantemente la carga producida por la aeronave.



- FLEXIBLE
- RÍGIDO

Los pavimentos flexibles se componen de una o varias capas de material granular construidas a partir de los materiales externos o estabilizando el propio terreno de la obra.

Los pavimentos rígidos consisten en losas de hormigón que descansan sobre el terreno, bien directamente o a través de una capa de material granular.

En la elección del tipo conveniente en cada caso influirán de manera decisiva el factor económico y de durabilidad, a no ser que la condiciones técnicas exijan zonas construidas con un tipo de pavimento especial.

Los pavimentos flexibles tienen la ventaja sobre los rígidos de la posibilidad de aumentar el rejuvenecimiento y reconstrucción con el total aprovechamiento de la parte construida y la de poder efectuar reparaciones y nuevas capas de rodadura con suma facilidad y economía, para el caso de envejecimiento o mala conservación.

En los últimos años, los países más avanzados han optado por incluir residuos procedentes de un proceso de reciclaje y reutilizarlos en diferentes aplicaciones, con el consiguiente ahorro económico y la posibilidad de deshacerse de materiales molestos.

En lo referente a los subproductos resultantes de la incineración, concretamente las escorias nos encontramos ante dos vías de valorización. La primera como parte de firmes estructurales (carreteras, aeropuertos, caminos rurales...) y la segunda como componente en la fabricación de ciertos tipos de hormigones y piezas no estructurales. En este trabajo estudiaremos la primera de ellas.

I CAPÍTULO. Evaluación del tráfico y elección de la aeronave tipo

La misión de los pavimentos de las pistas y la plataforma es la de transmitir las cargas de los trenes de aterrizaje de los aviones al terreno. Tenemos que conocer el tráfico y su composición que deberá soportar el pavimento en función de:

- Los distintos tipos de aviones
- Volumen del tráfico

Lo primero será conocer las aeronaves que operan, así como su MTOW (Maximum Takeoff Weight), el tipo de tren principal que tienen y el número de salidas máximas anuales. Con estos datos se entra en las curvas de la F.A.A (Federal Aviation Administration) para determinar el espesor necesario para cada tipo de avión.

Previsión del tráfico para el aeropuerto de Palma de Mallorca extraído del Plan Director aprobado el 2001.

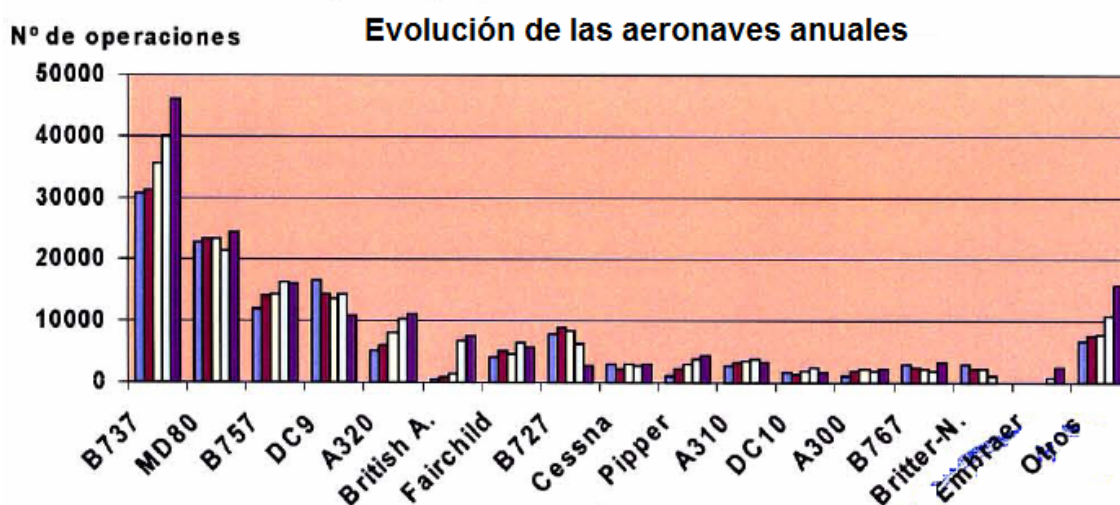


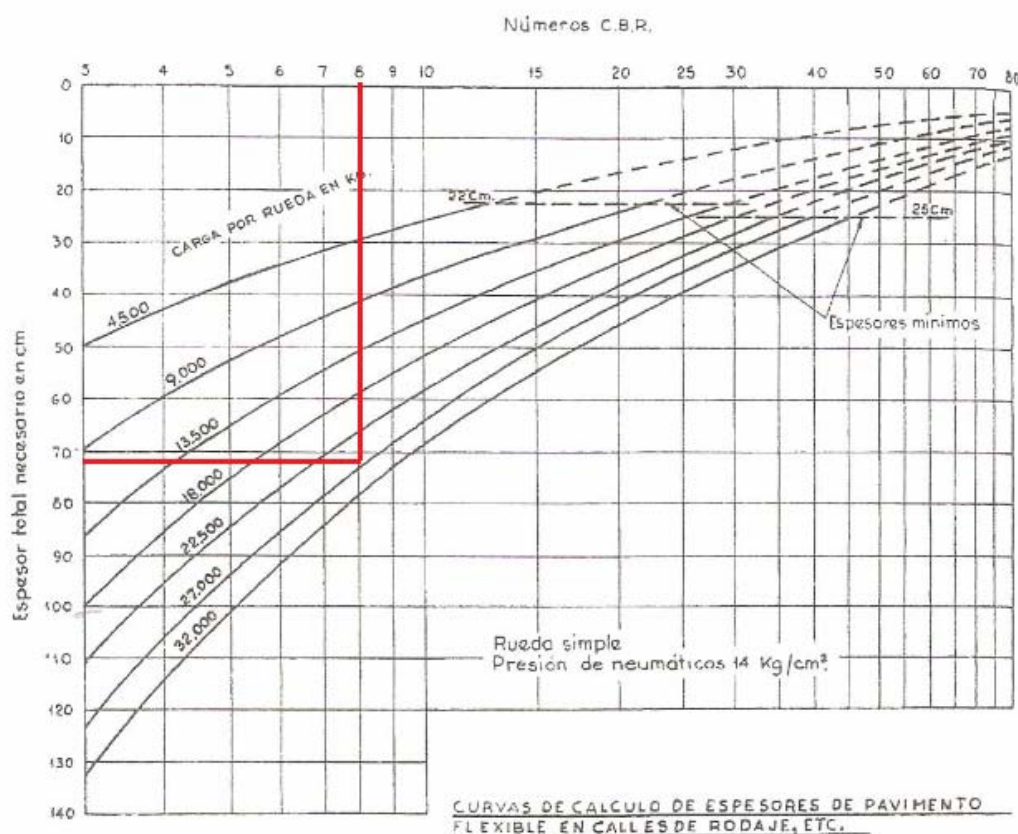
Fig 1.1. Evolución aeronaves anuales según el Plan Director

En la siguiente tabla observamos los porcentajes de las aeronaves determinantes que operaron en el aeropuerto de Palma de Mallorca en el 2010.

Taula 1.1. Numero de despegues realizados para cada aeronave

Tipo avión	Porcentaje despegues	de Nº despegues
MD80	19%	16589
B-737	28,7%	25000
B-757	10,1%	8881
DC9	9,8%	8556
A320	7,5%	6548
BRITISH A	4,3%	3754
B727	6,4%	5587
A310	3,2%	2793
DC10	2,1%	1833
A300	4,1%	3580
B767	4,8%	4191

Definimos la aeronave de cálculo como aquella, de entre todas las que van a utilizar las pistas, que (para el número de salidas máximas estimadas para un año y para un CBR= 8), necesita el mayor espesor de pavimento.

**Fig 1.2.** Curvas calculo espesores en pavimentos flexibles

Taula 1.2. Espesores recomendados según la F.A.A.

Tipo avión	de	Despegues máx. anuales	MTOW (kg)	Tipo tren	de	Espesor (cm)	total
B757		8881	109316	B(4)		70,9	
MD80		16589	63957	RG		68,8	
B-737		25000	61462	RG		68,5	
DC9		8556	68266	RG		69	
A320		6548	73500	RG		71,3	
British A		3754	40600	RG		64,8	
B727		5587	59000	RG		66,1	
A310		2793	138600	B(4)		67	
A300		3580	165000	B(4)		68,2	
B767		4191	159665	B(4)		67,8	

*RG= Ruedas gemelas, B(4)=Boogies.

De los resultados, vemos que la aeronave de cálculo o tipo es el A320, que es aquella para la que se requiere un mayor espesor de pavimento flexible $e=71,3$ cm.

I.I Determinación de las salidas equivalente de la aeronave tipo

A continuación calcularemos el número de salidas equivalente en todas las aeronaves que operan en el aeropuerto de Palma, en relación a las salidas que hace la aeronave determinante.

Como el avión tipo tiene ruedas gemelas tendremos que convertir todos los aviones de boogie de 4 ruedas a rueda gemela. Las normas de la F.A.A indican que se tiene que aplicar un factor de corrección del 1/0,6 al número de salidas reales de la aeronave (R_2).

A continuación tenemos que calcular el valor de la carga sobre cada rueda para cada avión.

Para nuestro avión tipo sería:

$$W_c = 0.95 \cdot \frac{MTOW}{n} = 0,95 \cdot \frac{73500}{4} = 17456,25 \text{ kg} \quad (1.1)$$

Por tanto cada rueda del A320 soportara 17 456,25Kg.

Finalmente, el número de salidas equivalentes de la aeronave de cálculo R_1 se determina con la expresión:

$$R_1 = \text{antilog}\left[\left(\frac{W}{W_c}\right)^{0,5} \cdot \log R_2\right] \quad (1.2)$$

Taula 1.3. Calculo de las salidas equivalentes para la aeronave tipo

Tipo de avión	Despegues anuales	Factor de conversión	Salidas con el tren de aeronave de cálculo (R_2)	Carga por rueda (kg)	Salidas equivalentes de la aeronave de cálculo (R_1)
B757	8881	1,67	14831,27	12981,27	3953,77
MD80	16589	1	16589	15189,78	8636,83
B-737	25000	1	25000	14597,22	10512,18
DC9	8556	1	8556	16213,17	6161,33
A320	6548	1	6548	17456,25	6548
British A	3754	1	3754	9642,5	453,57
B727	5587	1	5587	14012,5	2276,53
A310	2793	1,67	4664,31	16458,75	3651,09
A300	3580	1,67	5978,6	19593,75	10026,38
B767	4191	1,67	6998,97	18960,21	10168,30
Número total de salidas equivalente del A320					62387,98

Podemos considerar que todas las salidas de todas las aeronaves de la previsión del tráfico para el aeropuerto de Palma de Mallorca, son equivalentes a 62387,98 despegues de un A320.

II CAPÍTULO. Caracterización del paquete de firme

II.1 Calculo de espesores del pavimento flexible, método F.A.A

Los datos de entrada serian:

- Aeronave tipo: A320
- MTOW: 73 500 kg
- Número de salidas equivalentes: 62387,98
- CBR del terreno natural: 8

Los pavimentos flexibles constan de tres capas:

- Capa de rodadura de espesor T_1 , de mezcla bituminosa en caliente.
- Firme o base de material granular que puede estabilizarse de espesor T_2 .
- Subbase inferior o cimentación que puede estabilizarse de espesor T_3 .

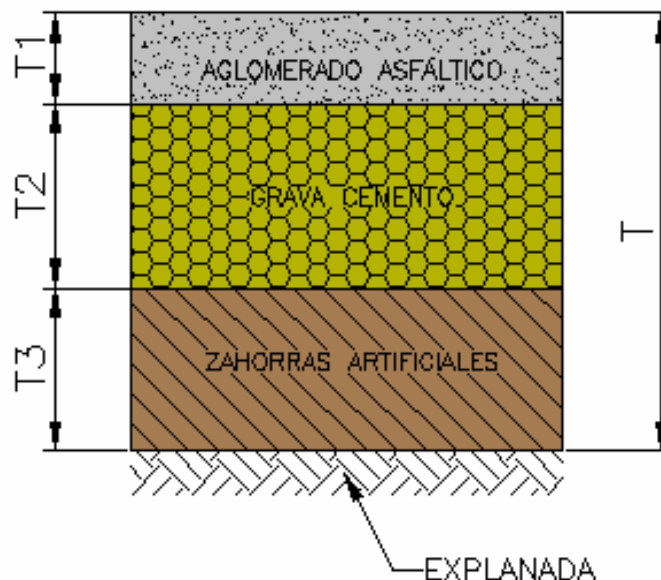


Fig 2.1. Modelo tipo de los pavimentos flexibles

La suma del espesor del firme más el espesor de la rodadura es lo que llamaremos T_4 . Por tanto;

$T_4 = T_2 + T_1$ o lo que es lo mismo $T_4 = T - T_3$.

Primeramente calcularemos los espesores sin estabilizar, y posteriormente aplicaremos una corrección para determinar los espesos estabilizados.

Entrando en los ábacos de la FAA, con los parámetros de cálculo correspondientes al tren de aterrizaje del avión de cálculo A-320, el número de salidas equivalentes y el CBR=8 del terreno natural, se obtiene un espesor total del pavimento de $T = 71,3$ cm.

El valor de T_1 se obtiene directamente de las graficas de la FAA para tren de aterrizaje de ruedas gemelas:

Taula 2.1. Espesores necesarios para la rodadura

Valor de la capa de rodadura T_1	
Zonas críticas	11 cm
Zonas normales	8 cm

El valor de T_4 se puede obtener también de las gráficas de la FAA, considerando que la subbase es un terreno de CBR mayor que el del terreno natural. Supongamos que el valor de CBR= 20 de la subbase que utilizaremos, por tanto los gráficos nos dan un valor de $T_4 = 35$ cm.

Si calculamos la capa de firme T_2 :

$$T_2 = T_4 - T_1 = 35\text{cm} - 11\text{ cm} = \mathbf{24\text{ cm}}$$

y calculamos la subbase T_3 :

$$T_3 = T - T_4 = 71,3\text{ cm} - 35\text{cm} = \mathbf{36,3\text{ cm}}$$

Mirando la normativa de espesores mínimos de base/firme (T_2) según el AC-150/5320-6D:

ESPESORES MÍNIMOS DE BASE SEGÚN AC-150/5320-6D de 1995

AVIÓN	Peso del avión		Espesor mínimo de base	
	lbs.	(Kg)	in.	(mm)
Rueda Simple	30.000 - 50.000	(13.600 - 22.700)	4	(100)
	50.000 - 75.000	(22.700 - 34.000)	6	(150)
Ruedas Gemelas	50.000 - 100.000	(22.700 - 45.000)	6	(150)
	100.000 - 200.000	(45.000 - 90.700)	8	(200)
Boogie de cuatro ruedas	100.000 - 250.000	(45.000 - 113.400)	6	(150)
	250.000 - 400.000	(113.400 - 181.000)	8	(200)
B-757 / 767	200.000 - 400.000	(90.700 - 181.000)	6	(150)
DC-10 / L.1011	400.000 - 600.000	(181.000 - 272.000)	8	(200)
B-747	400.000 - 600.000	(181.000 - 272.000)	6	(150)
	600.000 - 850.000	(272.000 - 385.700)	8	(200)
C-130	75.000 - 125.000	(34.000 - 56.700)	4	(100)
	125.000 - 175.000	(56.700 - 79.400)	6	(150)

Fig 2.2. Espesores mínimos según la normativa

El valor del espesor mínimo del firme para una aeronave de 73500 kg y tren de aterrizaje de ruedas gemelas, debe ser de 20 cm, que es inferior al valor obtenido mediante nuestros cálculos. Por tanto el espesor $T_2 = 24$ cm se considera válido.

Si recogemos todos los espesores **sin** estabilizar en una tabla:

Taula 2.2. Tabla resumen espesores totales paquete flexible

T1	T2	T3	T4	T
11 cm	24 cm	36,3 cm	35 cm	71,3 cm

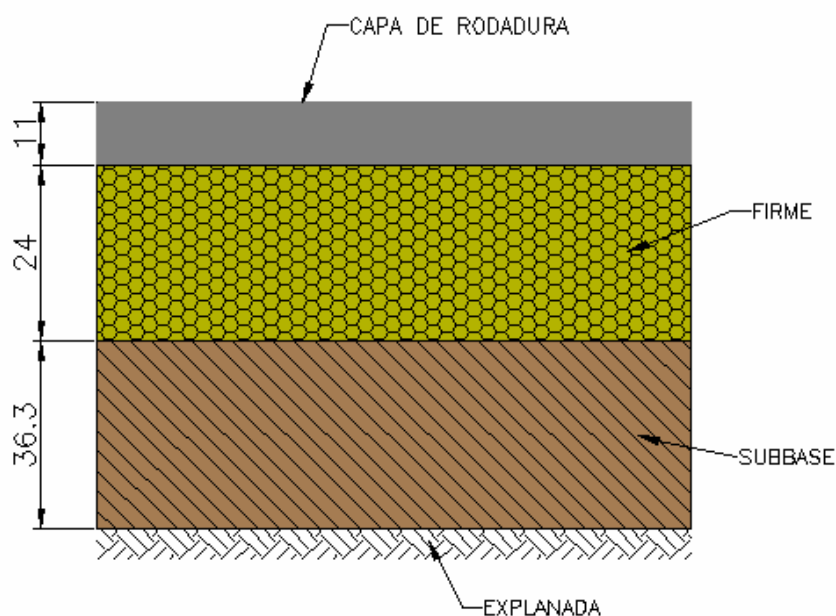


Fig 2.3. Modelo tipo pavimentos flexibles

Los detalles correspondientes a la construcción y ejecución de obra de las diferentes capas y la normativa que prescribe la FAA, pueden verse los detalles en el anexo G.

II.2 Cálculo de espesores de los pavimentos rígidos

Están formados por una losa de hormigón apoyada sobre un cimiento o subbase estabilizada, en la mayoría de los casos, y con una posible capa drenante, en plataformas, que va apoyada sobre el terreno y que tiene como objeto facilitar el subdrenaje de la plataforma.

El análisis de los esfuerzos que se desarrollan en estas losas de hormigón es enormemente complejo. Depende, en primer lugar, de las cargas de las ruedas y de las propiedades físicas de los suelos, que son en general variables no solamente de un lugar a otro, sino también dentro del mismo aeropuerto. En segundo lugar, depende de la posición de las cargas, de los cambios de temperatura y humedad de las placas, de la rugosidad de la superficie de rodadura y del factor de seguridad que se tome.

La subbase debe proporcionar a la losa un apoyo estable, la FAA recomienda un mínimo de subbase de 10 cm, para todo tipo de pavimentos.

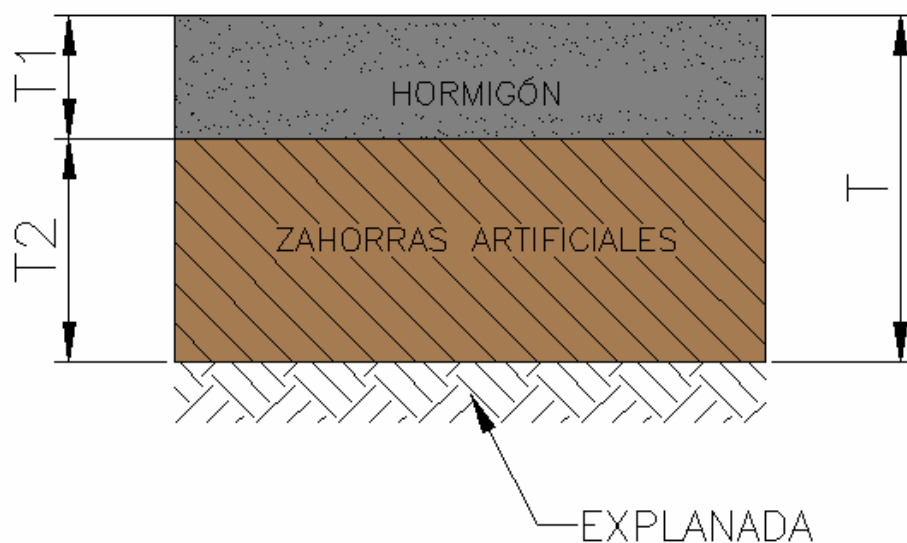


Fig 2.4. Modelo estándar para pavimentos rígidos

Calcular un pavimento rígido es determinar los valores de $T1$ y $T2$ de los espesores de la losa de hormigón y de la base estabilizada.

El método de cálculo propugnado por la FAA se basa en una hipótesis de carga en borde de junta con carga tangente a la misma.

La FAA proporciona unos gráficos de dimensionamiento en los que podemos determinar el espesor de la losa de hormigón conociendo:

- La forma del tren de aterrizaje
- La resistencia del hormigón a flexión a los 90 días
- El coeficiente de balasto K de la subbase estabilizada
- El peso máximo de despegue de la aeronave determinante
- Las salidas anuales equivalente del avión tipo

El espesor de la subbase se fija previamente y se tantean algunos valores para determinar el espesor más económico.

Las curvas necesarias para el cálculo de pavimentos se obtendrán de los ábacos de cálculo de la FAA.

El valor del coeficiente de balasto K se obtendrá a partir del valor del índice CBR como podemos ver en la Fig 2.5.

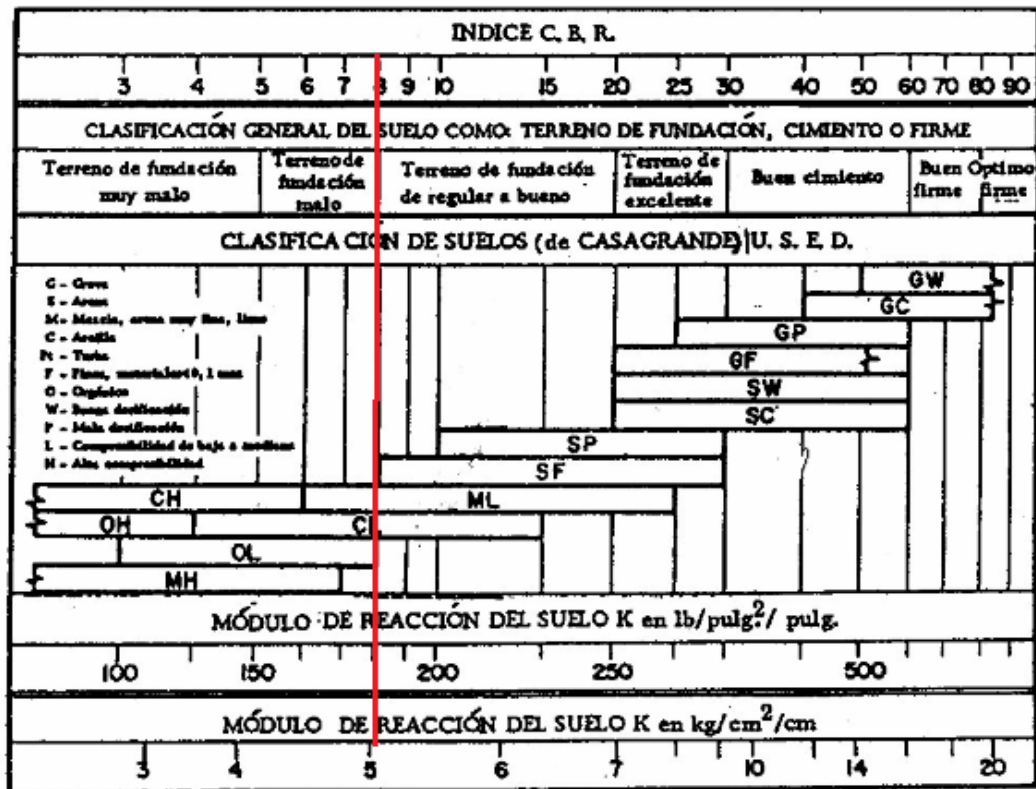


Fig 2.5. Obtención coeficiente de balasto terreno natural

Nuestro terreno sobre el que se va a construir la cimentación es igual al de la primera parte para pavimentos flexibles. Tiene un índice CBR=8 por tanto mirando en la grafica obtenemos un coeficiente de balasto de 5 kg/cm³.

En el caso que el terreno natural contenga un alto límite líquido, se emplea una capa de cimentación de mayor dimensión, debiendo entonces aprovechar el aumento que produce en el valor de K para reducir algo el espesor de la losa.

Cálculos:

- Terreno natural/fundación: $k = 5 \text{ kg/cm}^3$ (180 psi) para un CBR=8

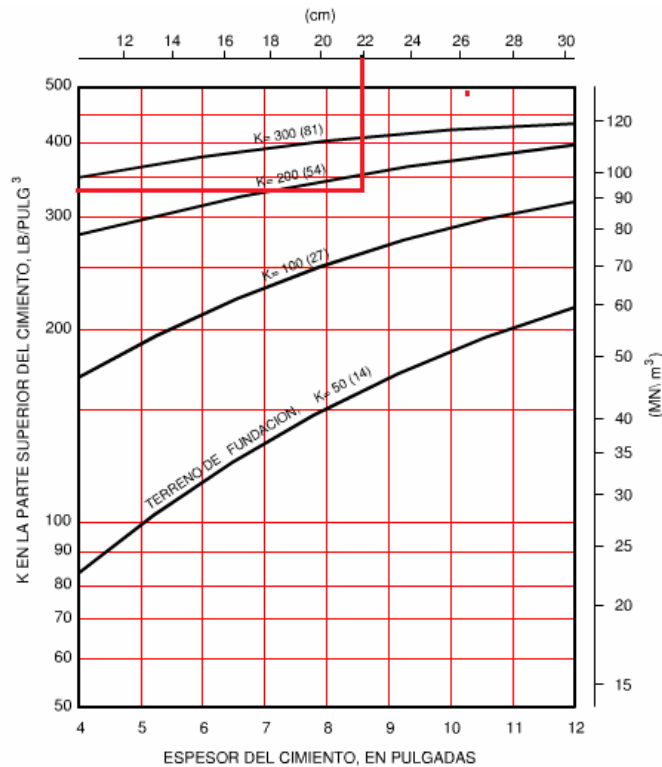


Fig 2.6. Curva calculo coeficiente de balasto según espesor elegido

Elegimos un espesor del subbase de 22 cm. Por tanto tenemos un coeficiente de balasto en la parte superior del cemento de $K = 320 \text{ lb/pulgadas}^3$ (8,86 kg/cm^3).

Para calcular el espesor de la losa de hormigón T_1 entramos a la gráfica con el $\text{MTOW}_{A320} = 73\,500 \text{ kg}$ y las características del tren de aterrizaje, para nuestro caso ruedas gemelas y obtenemos un espesor.

Como resistencia media del hormigón a flexiótracción se elige 49 kg/cm^2 a los 90 días.

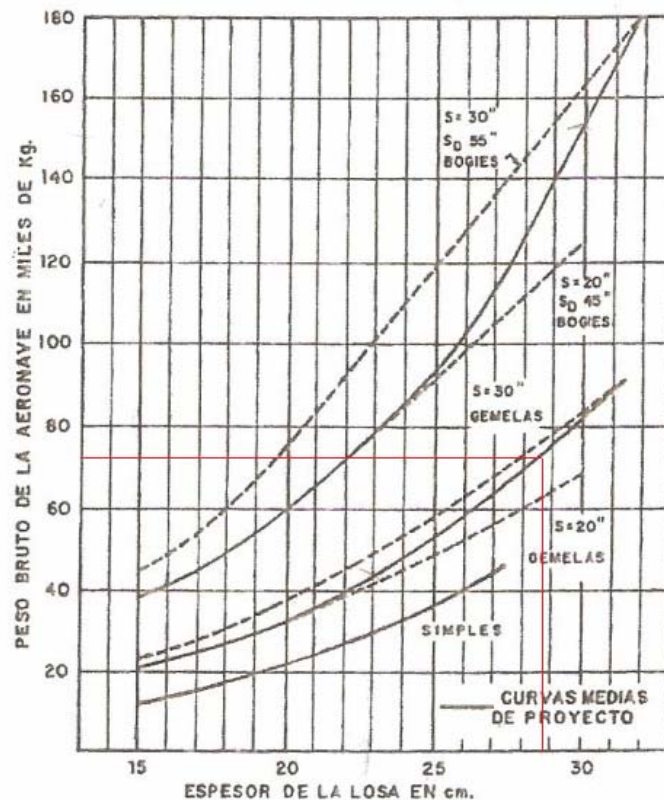


Fig 2.7. Calculo espesor losa hormigón

$T_1 = 28,8 \text{ cm.}$

Para calcular T_1 **equivalente** tenemos que saber la evaluación del tráfico y hacer las salidas equivalentes para la aeronave tipo. Nuestra aeronave tipo es el A320, ya que es el que exige mayor espesor como se demostró en el capítulo 1.

II.2.1 Determinación de los espesores equivalentes debido a la aeronave tipo

Del mismo modo que los pavimentos flexibles, calculamos las salidas equivalentes de todas las aeronaves que operan en el aeropuerto, en relación a las características de la aeronave tipo, el A320.

Se utilizara el número de salidas anuales equivalentes para el A320, el coeficiente de balasto del cemento $K = 8,86 \text{ kg/cm}^3$ y la resistencia a flexión del hormigón elegida 49 kg/cm^2 , para calcular el espesor equivalente que deberá tener la losa de hormigón.

Taula 2.3. Resumen características pavimento rígido

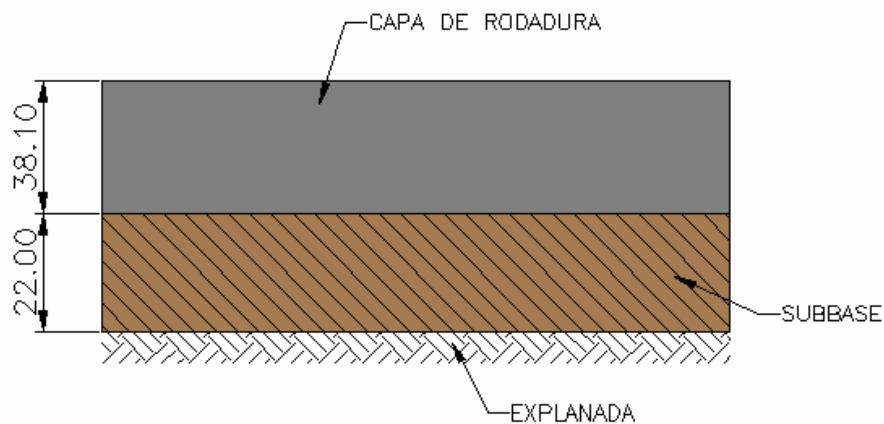
Resistencia flexión (kg/cm ²)	a	K (kg/cm ³)	T1 espesor de la losa	
			Normal	Equivalente
49		8,86	28,8 cm	38,1 cm

Utilizando la gráfica correspondiente para tren con ruedas gemelas y coeficiente de balasto del cemento $K=8,86 \text{ kg/cm}^3$ hemos obtenido un espesor del hormigón de 28,8 cm.

Con la siguiente formula obtendremos el espesor para las salidas equivalentes del A320.

$$T = 15 \cdot \left(1 + 0,133 \cdot \log \frac{62387,98}{25000} \right) = 15,79 \text{ in} = 38,1 \text{ cm} \quad (2.1)$$

Por tanto tendremos una losa de hormigón de $T_1=38,1\text{cm}$ y una subbase de $T_2=22\text{cm}$.

**Fig 2.8.** Espesores pavimento rígido

II.3 Cálculo de la resistencia en los pavimentos

En este capítulo se determinará, mediante el método ACN-PCN, si la resistencia del pavimento de las pistas, calles de rodaje y plataforma del aeropuerto de Palma de Mallorca son aptas para que opere la aeronave tipo A320.

Las compañías aéreas y demás operadores del aeropuerto deben conocer la resistencia del pavimento sobre el que van a operar. Se trata de un método para informar de la capacidad de un pavimento aeroportuario para recibir un determinado tipo de avión.

Los cálculos de este apartado se basan en el *Manual de proyecto de aeródromos, Parte 3*. El contenido de este manual está relacionado estrechamente con las especificaciones del Anexo 14 (Pavimentos), que recomienda el método ACN-PCN.

El único objetivo del método ACN-PCN es la difusión de los datos sobre resistencia de los pavimentos en las publicaciones de información aeronáutica AIP.

A continuación definiremos los conceptos de PCN y ACN ya que son básicos para entender qué es el método ACN-PCN.

II.3.1 Concepto de PCN

El PCN (Paviment Classification Number), es el número de clasificación de pavimentos y expresa la resistencia de un pavimento a poderlo utilizar sin restricciones.

Éste queda definido por un número, y cuatro siglas correspondientes que definen el valor de ese número y hacen referencia al tipo de pavimento, la categoría de resistencia del terreno de fundación, la categoría de presión máxima permisible de los neumáticos y el método de evaluación:

1. Tipo de pavimento:

R: Pavimento rígido

F: Pavimento flexible

2. Categoría de resistencia del terreno de fundación:

Taula 2.4. Clasificación según las características del terreno de fundación

Nombre	Pavimentos Rígidos		Pavimentos Flexibles	
	Valor tipo	Rango	Valor tipo	Rango
Resistencia alta (A)	K=150MN/m ³	k>120MN/m ³	CBR=15	CBR>13
Resistencia mediana (B)	K=80MN/m ³	60<k<120MN/m ³	CBR=10	8<CBR<13
Resistencia baja (C)	K=40 MN/m ³	25<k<60MN/m ³	CBR=6	4<CBR<8
Resistencia ultra baja (D)	K=20 MN/m ³	25MN/m ³ <k	CBR=3	4<CBR

3. La categoría de presión máxima permisible de los neumáticos:

W→ Alta: sin límite de presión.

X→ AMediana: presión limitada a 1,50 MPa.

Y→ Baja: presión limitada a 1,00 MPa.

Z→ Muy baja: presión limitada a 0,50 MPa.

4. Método de evaluación:

T: Evaluación técnica: consiste en un estudio específico de las características de los pavimentos y en la aplicación de tecnología del comportamiento de los pavimentos.

U: Aprovechamiento de la experiencia en la utilización de aeronaves: comprende el conocimiento del tipo y masa específicos de las aeronaves que los pavimentos resisten satisfactoriamente en condiciones normales de empleo.

II.3.2 Concepto de ACN

El número de Clasificación de la Aeronave, ACN (Aircraft Classification Number), expresa el efecto relativo de una aeronave sobre el pavimento, es decir, dicho número refleja la carga que ejerce una aeronave sobre la superficie del terreno de fundación.

Se calcula con respecto a la posición del centro de gravedad (CG) de la aeronave que produce la carga crítica sobre el tren crítico ya que se trata de el caso más desfavorable.

Los fabricantes de aeronaves publicaran en el AIP los ACN calculados con dos masas diferentes; la masa máxima en plataforma y la masa representativa de

operación en vacío, tanto sobre pavimentos rígidos como flexibles. En el Anexo D, se incluye una tabla con los ACN de varias aeronaves. Tenemos que destacar que la masa empleada en el cálculo del ACN es una masa estática, y no prevé el aumento de la carga por efectos dinámicos.

II.3.3 Método ACN-PCN

La sobrecarga de los pavimentos puede ser provocada por cargas muy elevadas, por un ritmo de utilización considerablemente alto, o por la combinación de ambos factores. Las cargas que son superiores a aquellas que un pavimento pueda llegar a absorber, acortan su vida útil.

Los pavimentos son diseñados para poder soportar una carga máxima definida o valores inferiores a ésta durante un número previsto de veces en el transcurso de su vida útil. Dicha carga definida para cada tipo de pavimento es la que se expresa en el PCN, y se compara con el número de clasificación de la aeronave determinante (ACN) que va a operar sobre esta superficie.

Este concepto, propuesto por la OACI es el conocido como “Método ACN-PCN” y es totalmente necesario para determinar si una aeronave puede operar sobre un pavimento determinado.

El criterio general del método ACN-PCN para permitir la operación de una aeronave en una pista es que si $ACN < PCN$ el avión podrá operar sin restricciones. No obstante, si es al contrario, los criterios a seguir serían:

- Sobre pavimentos flexibles, los movimientos ocasionales de aeronaves cuyo ACN no exceda del 10% del PCN notificado, no serían perjudiciales para el pavimento.
- Sobre pavimentos rígidos, los movimientos ocasionales de aeronaves cuyo ACN no exceda en más de un 5% el PCN notificado, no serían perjudiciales para el pavimento.

II.3.4 ACN vs PCN en el A320

Como ya sabemos, un avión que tenga un $PCN > ACN$ puede operar sin restricción sobre el pavimento que posee ese PCN, por lo tanto, analizaremos el número de ACN del A320 para comprobar si se cumple esta condición.

Conocido el ACN del avión más crítico que va a operar sobre el pavimento bastará determinar el espesor de forma que el PCN sea superior o igual al ACN crítico.

De la tabla adjunta en el Anexo D se obtiene un ACN para la aeronave de cálculo, A320, en un terreno de fundación alto (CBR=20) y un MTOW= 73.500 kg.

Rígido:	Flexible:
ACN "A"= 44	ACN "A"=38

Una vez tenemos el ACN de la aeronave tenemos que establecer la información referente al PCN:

1. Tipo de pavimento: letra F, por ser el pavimento flexible.
2. Resistencia del terreno de fundación: Al ser CBR= 20 se considera que es un terreno de resistencia alta (CBR>13), letra A.
3. Presión de inflado de los neumáticos: consideramos que no hay límite en la presión de inflado, así que se añade la letra W.
4. Método de evaluación del PCN: al realizarse un estudio específico, se añade la letra T.

Por tanto tenemos un terreno: **PCN 38/F/A/W/T**

II.3.5 Análisis de pavimentos en el Aeropuerto de Palma de Mallorca

Para comprobar que actualmente puede operar una aeronave A320 sin ninguna restricción, nos fijamos en la información generada por el AIP del Aeropuerto del Palma de Mallorca, que aparece en el Anexo D.1.

Se comprueba aquellas que son de carácter flexible o rígido, y se comparan con los ACN encontrados anteriormente. En aquellas pistas, calles de rodaje y plataformas donde se cumpla la condición necesaria de $PCN > ACN$, el A320 podrá operar.

Como vemos, en los datos del Anexo D.1, todos los pavimentos pueden ser utilizados por el A320 debido a que respeta la condición $PCN > ACN$.

Se adjunta el Plano D.2, con soporte informático de Autocad 2008 donde se diferencia la plataforma militar, que por razones de falta de datos, no sabemos su resistencia, y por tanto no podemos garantizar la operación de un A320.

II.3.6 Conclusiones

En este capítulo se ha hecho un estudio de la resistencia de los pavimentos a las cargas producidas por el A320:

- Inicialmente, hemos definido ACN, PCN y su relación, es decir, el método ACN-PCN.
- Posteriormente, hemos realizado el estudio de cuál sería el ACN correspondiente del A320 sobre pavimentos rígidos y flexibles según las tablas proporcionadas por la OACI.
- Para terminar, conociendo los resultados los hemos comparado con el Aeropuerto de Palma de Mallorca, hemos verificado que todos los pavimentos tanto rígido como flexible pueden soportar las cargas del A320.

II.4 Elección del material cumpliendo la FAA para el aeropuerto de Palma de Mallorca

II.4.1 Caracterización de nuestro suelo natural

Los suelos naturales no poseen en general las características necesarias para soportar el tráfico rodado de las aeronaves, por lo que unas veces es necesario construir los pavimentos con materiales totalmente de aportación exterior, y en otras ocasiones aprovechar en todo o en parte, los productos naturales existentes en el lugar, mediante los tratamientos necesarios.

La posibilidad de construir estos firmes hay que deducirla de los análisis correspondientes del terreno natural que tenemos, del cual llegamos a conocer su aptitud para soportar las cargas durante el periodo de proyecto.

Por otra parte, los pavimentos soportan más carga y son más estables cuanto más compactos son, lo cual se cumple con una composición granulométrica adecuada, debiendo estar los finos y gruesos del terreno en una proporción cuyo ideal puede deducirse de una formula análoga a la de Fuller 2.2.

$$P = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.2)$$

En la cual P es el tanto por ciento en peso que pasa por el tamiz de diámetro d , D es el diámetro máximo de los áridos del suelo y n es un número comprendido entre 2 y 4. Así se obtiene la curva de composición que se observa en la Fig 2.8.

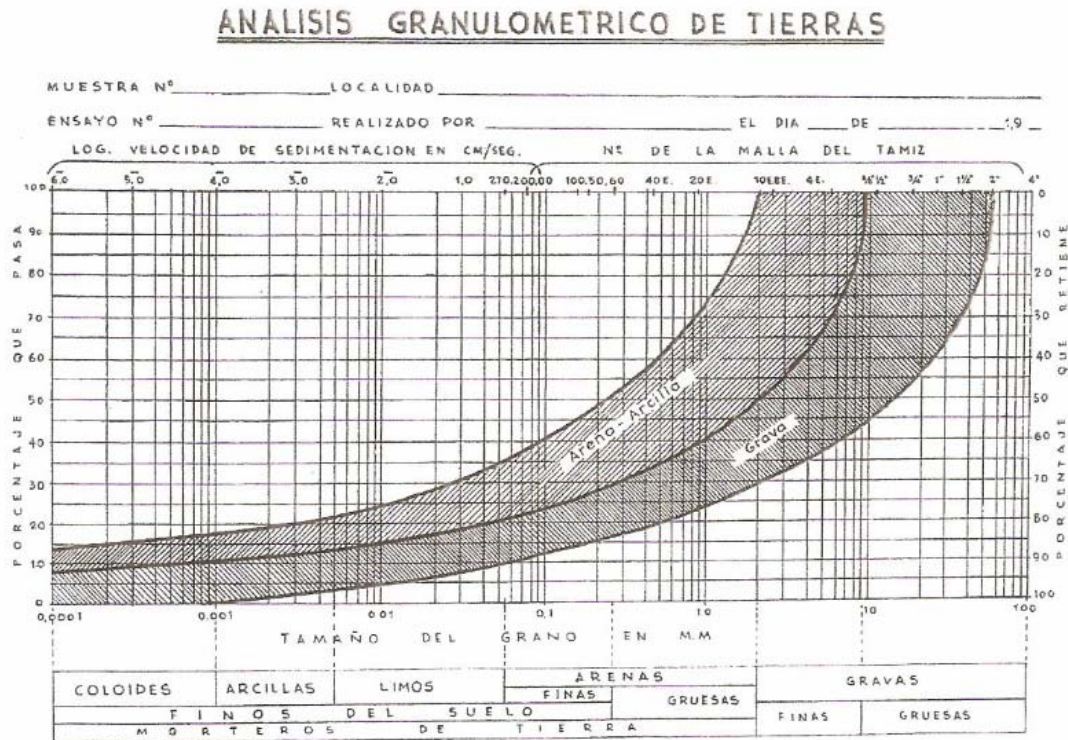


Fig 2.9. Márgenes de seguridad

La granulometría del terreno natural deberá estar dentro del huso para conseguir la estabilidad precisa, asegurando que las capas superiores a construir queden bien asentadas y estabilizadas. Por tanto el terreno natural no deberá contener en proporciones apreciables coloides, micas, materia orgánica que por estar sujetas a fuertes cambios de volumen son causa de falta de estabilidad de los suelos.

Las constantes físicas a exigir en un suelo varían con las condiciones climatológicas del lugar, ya que los cambios de volumen que pueden experimentar dependen de la cantidad de lluvia, de la evaporación y del drenaje del suelo.

La FAA especifica que los tipos de suelos aptos para pavimentos naturales pueden ser las mezclas naturales (Tipo A) o artificiales (Tipo B) que respondan a las composiciones granulométricas que se muestran en la Tabla 2.5, debiendo cumplirse además las condiciones 1 y 2:

1. La fracción que pasa por el tamiz número 200 debe ser menor que las 2/3 de la fracción que pasa por el tamiz número 40.

$$11 < \frac{2}{3} \cdot 28$$

APTO

2. La fracción que pasa por el tamiz numero 40 debe tener un límite líquido menor de 30, y un índice de plasticidad no mayor de 8.

LL: 23,7 < 30

IP: 7,8 < 8

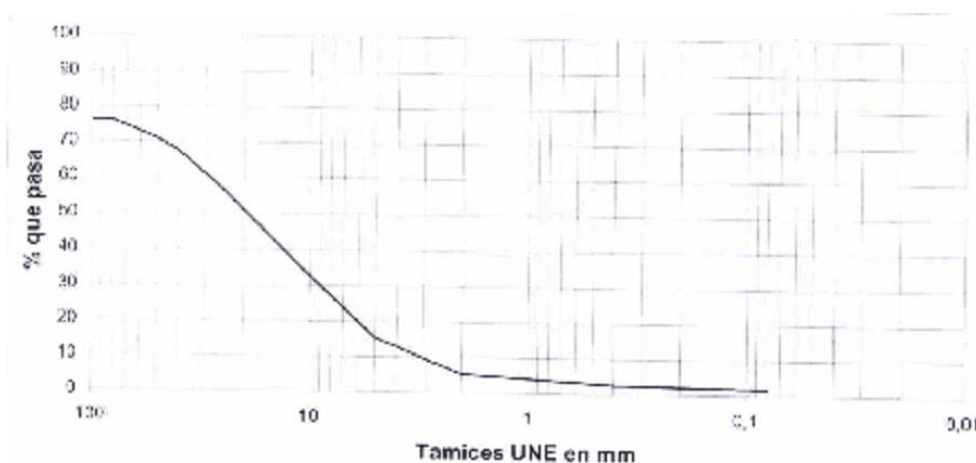
APTO

APTO

Taula 2.5. Tamización según la F.A.A para categorizar un terreno natural

Tamiz según ASTM	% EN PESO QUE PASA POR LOS TAMIZES			
	Tipo A	Muestra ensayada	Aceptable	/no
19,05mm	70-100	90	Cumple	
Núm. 10	40-70	55	Cumple	
Num. 40	20-45	28	Cumple	
Num.200	10-20	11	Cumple	

Tabla resumen de las características de nuestro terreno encontrado en las proximidades del Aeropuerto de Palma de Mallorca:



TERRENO NATURAL	
Espesor	-
Contenido sales (%)	0,02
Materia orgánica (%)	0,02
Límite líquido	23,7
Límite plástico	13,3
Índice plástico	7,8
CBR (90%) de compactación	20
Densidad Max(g/ml)	-
Humedad óptima (%)	7,8

Clasificación: Suelo Tolerable.

Para concluir este capítulo hemos llegado a la conclusión que nuestro terreno natural tiene la estabilidad necesaria. Por eso no son necesarios tratamientos estabilizadores.

Nuestra curva granulométrica del ensayo es muy regular y no presentar garrotes ni fuertes cambios de pendiente. Estas características son propias de de las explanadas E-2.

II.4.2 Caracterización del FIRME y SUBBASE

Elegimos el firme y la subbase que pondremos sobre nuestro terreno natural cumpliendo **la normativa** de la F.A.A en cada caso. Puede verse en el anexo F y G.

FIRME

La capa de firme será estabilizada como prescribe la F.A.A. Estará compuesta por grava cemento de espesor $e=24\text{cm}$ convencional. Dado que la capa de firme no será objeto de sustitución no profundizaremos sobre sus características al igual que la capa de rodadura. Ambas las consideramos invariables tanto para el caso del paquete convencional como el paquete sustituyendo las zahorras por escorias.

Un método de la FAA es crear unos factores de equivalencia \square iguales o superiores a la unidad, para obtener los espesores de las capas estabilizadas. Basta dividir el espesor de la capa estándar por el factor de equivalencia.

$$\text{Espesor estabilizado} = \frac{\text{Espesor estándar}}{\text{Factor de equivalencia}} \quad (2.2)$$

Elegimos para nuestro firme el siguiente factor de equivalencia recomendado por la normativa FAA.

- Firme: Factor de equivalencia entre 1.2-1.6. Se elige $\square = 1.4$

Considerando el valor medio en el rango de valores recomendados por la FAA.

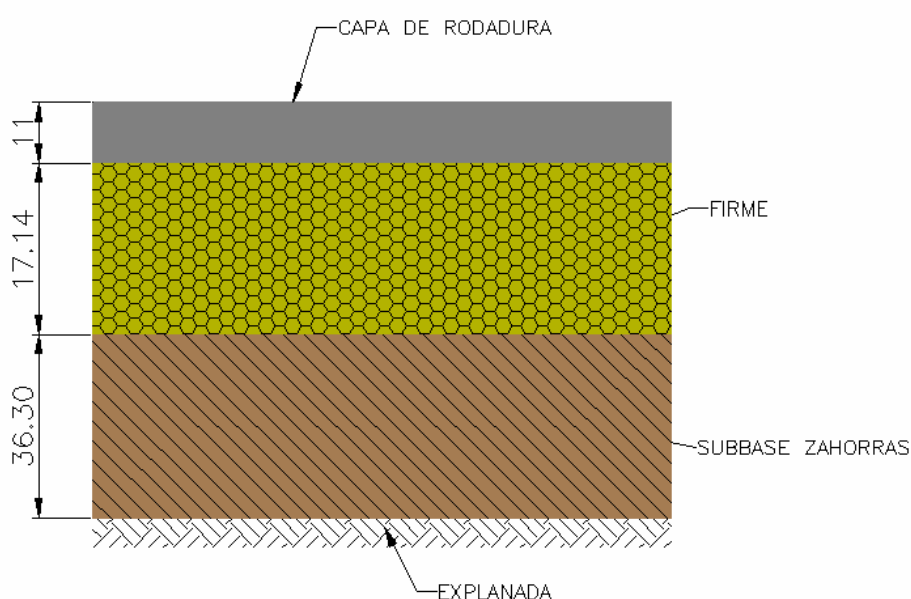
Así los espesores finales estabilizados quedarían:

Taula 2.6. Espesores aplicando el factor de equivalencia

	T1	T2	T3	T4	T
Sin estabilizar	11cm	24 cm	36,3 cm	35 cm	71,3 cm
Estabilizados	11 cm	17,14 cm	36,3 cm	28,14 cm	64,44 cm

Podemos apreciar que el espesor se ha reducido notablemente gracias a la estabilización.

Representación de los espesores estabilizados:

**Fig 2.10.** Espesores estabilizados pavimentos flexibles

SUBBASE

La capa de la subbase estará compuesta por unas zahorras artificiales de espesor $e=36,3\text{cm}$ sin estabilizar.

A continuación observamos detalladas las características de las zahorras utilizadas como subbase en caso del paquete convencional.

Para el caso del paquete sustituyendo las zahorras por escorias, las características de las escorias se verán detalladas en el capítulo 3.5.

Gráfica granulométrica de las zahorras:



Ensayo de caracterización:

SUBBASE: Base granular de zahorras artificiales	
Equivalente de arena	49
Límite líquido	-
Límite plástico	-
Índice plástico	NP
CBR (100%) de compactación	73,8
Densidad máx.(g/ml)	2,37
Humedad óptima (%)	7,2

El porcentaje que pasa por los tamices 4, 40 y 200 cumplen las exigencias de la normativa de la F.A.A en lo que conlleva la subbase, como puede verse en la gráfica.

Por otra parte, el material es no plástico, por tanto cumple las prescripciones en cuanto a plasticidad referidas a los límites de Atterberg (límite líquido e índice de plasticidad).

Ver la normativa en el anexo G.

III CAPÍTULO. Sustitución de las zahorras artificiales por escorias procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos en diferentes capas de firmes aeroportuarios.

III.1 Antecedentes

La gestión de los residuos urbanos en la isla de Mallorca está regulada por el ***Pla Director Sectorial per a la Gestió de Residus Urbans de Mallorca***, Decret 21/2000, de 18 de Febrer, BOIB No.25 de 26-2-2000 (PDSGRUM), cuya última revisión fue aprobada por el Pleno del Consell el 6 de febrero de 2006 (BOIB num. 35, de 9 de marzo de 2006).

El PDSGRUM del 2000 definió un nuevo modelo de gestión de los residuos con respecto al existente en la isla, que marcaba unos hitos y objetivos superiores a los exigibles por la normativa vigente en aquel momento. El esquema de tratamiento planteado se regía por la jerarquía de principios establecida por las Directivas Europeas sobre estrategias en la gestión de residuos, situándose la prevención de la generación como la máxima prioridad, seguida por la valorización y, en última instancia, la eliminación segura de los residuos.

Con este Plan Director se impulsó la construcción de nuevas plantas de tratamiento de residuos (planta de selección de envases, plantas de compostaje, plantas de metanización...) para complementar a las instalaciones ya existentes (Planta Incineradora con Recuperación de Energía de Son Reus - PIRE-, Estaciones de Transferencia...). Así mismo, otro de los avances de este Plan Director fue definir el tratamiento y/o destino de los subproductos de incineración, no contemplados en el Plan Director existente hasta ese momento, definiendo una Planta de Tratamiento de Escorias para su aprovechamiento posterior y un Depósito de Seguridad para las cenizas volantes y los residuos de depuración de gases de la PIRE.

Las últimas estimaciones de producción de residuos urbanos en Mallorca, las nuevas previsiones de recogida selectiva y el rechazo producido por las actuales Plantas de Tratamiento de Residuos Urbanos y de Residuos de Construcción, Demolición, Neumáticos y Voluminosos, hicieron necesaria una remodelación del PDSGRUM del año 2000, para su adaptación a la situación actual, planteándose una revisión del texto que fue aprobada por el Pleno del Consell en el año 2006. En este Plan se incluyó la revisión del horizonte temporal del alcance de objetivos; la revisión del modelo de recogida selectiva, así como la adaptación a este modelo de las Estaciones de Transferencia; la adaptación de las infraestructuras al nuevo flujo de residuos urbanos procedentes del tratamiento de los residuos de construcción/demolición; así como la mejora de los accesos a las instalaciones.

La consecución de los objetivos planteados en dicha revisión del PDSGRUM se fundamentó en la base metodológica de las operaciones de gestión de los residuos que se plantean en el propio plan. Una de estas operaciones clave en el modelo de gestión insular es el fomento de la utilización de los subproductos procedentes del tratamiento de residuos, entre ellos, las escorias.

Con el objetivo de impulsar la utilización de los subproductos TIRME ha realizado y/o colaborado en multitud de estudios relacionados con el aprovechamiento y la utilización de escorias para diversos fines. Algunos de estos estudios se citan a continuación:

“Estudio del aprovechamiento de las escorias de incineración de R.S.U para la construcción de terraplenes”(*Conselleria de Foment. Direcció general d'infraestructures. Departament de Carreteres. Govern Balear. 1999*)

“Estudio de las escorias procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos para su empleo en la construcción de carreteras”. (*Laboratorio del departamento de carreteras de la Conselleria de Foment. Conselleria del Medi Ambient. Ordenció del Territori i Litoral. Direcció General d'Ordenació del Territori i Urbanismo. Govern Balear*)

“Estudi i optimització de l'aprofitament dels residus d'incineradora per el seu ús en carreteres” (*UIB. M.Concepció Seguí Palmer. María Far Sánchez*).

“Characteritzation of bottom ash in municipal solid waste incinerators for its use in road base”. (*R.Forteza, M.Far, C.Seguí, V.Cerdà. Department of Chemistry, Faculty of Sciences, University of the Balearic Islands. Elsevier*)

“Valoración de escorias de incineración de residuos sólidos urbanos: como “zahorra natural” para sub-base de carreteras”.(*LBC, Laboratorio Balear para la Calidad. Peticionario: TIRME, S.A.*)

“Plan de trabajos para la ejecución de un estudio sobre la posible utilización de escorias de incineración de residuos sólidos urbanos en una fábrica de bordillos y adoquines” (*Tubos y bloques Fiol. S.A y laboratorio Balear para la Construcción S.L. Plan de trabajo 010720 Rev.1 de fecha 03-07-2001*)

“Proyecto sobre la caracterización de escorias procedentes del horno de incineración de residuos sólidos urbanos” (*SCIWARE, S.L.*)

“Aspectos medioambientales de la valoración como materia prima de escoria de residuos sólidos urbanos” (*Cemex. España. Fábrica de Lloseta. Gerente de medio Ambiente. Inmaculada Linares Barrera*).

“Autocontrol de las emisiones gaseosa” (Cemex. España. Fábrica de Lloseta. Agosto 2004. Informe de inspección 3.77.046)

“Valorización de escorias de incineración de residuos sólidos urbanos como “Zahorra artificial” para base de carreteras”(Ref * 37459/040518/00412* Laboratorio Balear para la calidad (LBC)-Peticiónario TIRME,S.A.)

“Valorización de escorias procedentes de un horno de incineración de residuos sólidos urbanos:”.(UIB.-Maria E:Rosende Mustillo-Víctor Cerdà. 2007)

“Estudio de caracterización de escorias generadas en la planta de incineración de residuos urbanos de Palma de Mallorca para su empleo en la construcción de carreteras” (CEDEX, Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente, medio rural y marino, 2008)

“Consideraciones preliminares para la ejecución de un tramo experimental de vial con escoria de incineración de residuos sólidos urbanos en el polígono industrial Ses Veles” (TIRME, S.A. 2008)

“Proyecto de reciclaje de escorias de incineración para su uso como firme y explanada en carreteras.Estudio ambiental y geotécnico aplicado a un tramo de vía experimental.” (TIRME, S.A. 2009)

“Estudio de caracterización de escorias procedentes de incineración para usos en obra civil y fabricación de piezas de hormigón no estructurales” (TIRME, S.A. 2010)

“Obtención del Mercado CE para las escorias según UNE-EN 12620:2003 “Áridos para hormigón” y UNE-EN 13242:2003 “Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para su uso en capas estructurales de firmes”(TIRME, S.A. 2011)

TIRME, S.A ha realizado además dos pruebas con sus escorias de incineración tratadas en colaboración con el Departament de Carreteres del Govern de les Illes Balears. Los resultados se presentaron en la literatura citada en este documento (**“Estudio del aprovechamiento de las escorias de incineración de R.S.U para la construcción de carreteras”**). En estas pruebas no se realizó ningún estudio plenamente ambiental pero si se caracterizaron las escorias en laboratorio y en campo en función de su comportamiento mecánico.


III.2 Introducción

La escoria procedente del proceso de incineración de RU y su uso para la construcción de carreteras, así como para otros usos en obra civil ha sido común en multitud de países durante los últimos veinte años, principalmente en aquellos que han producido o producen escorias a partir de sus residuos incinerados. Aún así su modo de vertido o su utilización como producto valorizable varía según las diferentes legislaciones, mostrando un panorama internacional con diferencias importantes entre las estrategias de gestión del residuo (*Management of Bottom Ash from WTE Plants*, ISWA) y con métodos propios de análisis y caracterización de la escoria que dificulta la regulación uniforme en Europa.

Por otro lado, los procedimientos a seguir con la escoria y su uso en carreteras se discuten en multitud de estudios técnicos y ambientales en la comunidad científica. Su uso como material de construcción secundario ya se ha llevado a cabo en varias regiones donde se regula, bajo las condiciones de cumplimiento de ciertos requisitos medioambientales y técnico-civiles, la aplicación de la misma.

La escoria recién salida del horno no suele presentar las condiciones necesarias para su uso como base inferior de carreteras pero los tratamientos y la maduración de la escoria reducen los mismos hasta valores en el lixiviado admisibles según las regulaciones aplicables. Entre sus usos destacables en la construcción podemos citar la subbase de carreteras y la coronación en terraplenes como campos de aplicación de mayor alcance, donde la escoria suple a ciertos materiales de construcción convencionales cuya explotación representa grandes costes económicos, una disminución de recursos naturales y el consumo de grandes cantidades de energía incidiendo negativamente en factores ambientales tales como el cambio climático.

Gracias al estudio científico en la comprensión de los fenómenos relacionados con la lixiviación y al avance tecnológico de los numerosos tratamientos que puede recibir la escoria antes de su utilización, se reducen hasta valores mínimos las concentraciones críticas en el lixiviado. En última instancia la escoria tratada se transforma en un producto útil cuyas características apenas divergen de algunos materiales comunes en la construcción, ya no sólo en sus propiedades estructurales, sino también en las composiciones químicas de sus posibles emisiones, eliminadas, neutralizadas o inmovilizadas en la matriz de la carretera.

En este proyecto se evalúan las propiedades geotécnicas de la escoria en sustitución de la zahorra artificial en la capa de subbase. Los aspectos ambientales no son objeto del estudio aunque cabe destacar que las escorias producidas en las instalaciones de TIRME, S.A. poseen el marcado  que da conformidad a la Directiva 89/106/CE sobre Productos de la Construcción. Esta Directiva tiene como objetivo primordial la libre circulación de productos de la construcción en el mercado de la Unión Europea y dispone que estos

productos de la construcción, como es el caso de los áridos, que se incorporan con carácter permanente a las obras, se deben adaptar a los requisitos esenciales de seguridad y salud así como otros requisitos de carácter técnico y ambiental como son la resistencia mecánica y estabilidad, seguridad en caso de incendio, higiene, salud, ahorro energético,...

El marcado **CE** indica que los áridos son conformes con las “normas armonizadas”, normas establecidas por el Comité Europeo de Normalización (CEN).

Las normas ensayadas han sido UNE-EN 12620:2003 “Áridos para hormigón” y UNE-EN 13242:2003 “Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para su uso en capas estructurales de firmes”.

Una diferencia substancial de esta certificación es que, además de certificar los aspectos mecánicos del material, en la ficha de marcado **CE** se declaran los aspectos ambientales. Concretamente se han ensayado los parámetros correspondientes al cumplimiento de la Orden catalana del 15 de febrero de 1996, para la valoración de escorias de incineración (num. 2181, Diario Oficial de la Generalitat de Catalunya de fecha 13/3/1996), el Reglamento (CE) nº 850/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, sobre contaminantes orgánicos persistentes, Reglamento (CE) nº 1195/2006, por el que se modifica el anexo IV del Reglamento (CE) nº 850/2004, Reglamento nº 172/2007 por el que se modifica el anexo V del Reglamento (CE) nº 850/2004 y Reglamento (UE) nº 756/2010 por el que se modifica el Reglamento (CE) nº 850/2004 en lo que se refiere a los anexos IV y V y los parámetros correspondientes al anexo III de la Directiva 2008/98/CE que define la clasificación de los residuos según peligrosidad.

Ver anexo L, donde se presenta la ficha del mercado CE para las escorias 0/20, ensayadas.

III.3 Marco legal

- **Pla Director Sectorial per a la Gestió de Residus Urbans de Mallorca, Decret 21/2000, de 18 de Febrer, BOIB No.25 de 26-2-2000), (PDSGRUM) y su revisión del año 2006**

En el PDSGRUM del año 2000, en cuanto al tratamiento y la reutilización de las escorias, se regía el Artículo 12: ***Destino de las escorias procedentes de la valorización energética:***

“12.1 Las escorias procedentes de la valorización energética que no tengan consideración de residuo peligroso se podrán utilizar como materia prima en las siguientes aplicaciones.

- a) Recuperación de la parte metálica.

b) Utilización de la fracción mineral:

- i) Para el relleno de terraplenes y base inferior de carreteras.
- ii) Como sustituto de las arcillas en la fabricación de cemento.
- iii) Como sustituto de áridos para la fabricación de diferentes productos.
- iv) Otros usos, específicamente autorizados por la Conselleria de Medi ambient.

c) Restauración de canteras de acuerdo con lo que prevé el Decreto 61/ 1999, del 28 de mayo, de aprobación definitiva de la revisión del Plan Director Sectorial de Canteras de las Illes Balears.

12.2 El tratamiento de las escorias se realizará según los requisitos técnicos mínimos que se especifican en el anexo VIII del PDSGRUM.

12.3 Todos los usos como materia prima secundaria tendrán que estar específicamente autorizados por la Conselleria de Medio Ambiente que exigirá un control periódico que garantice la no peligrosidad de la reutilización de las escorias. Estas autorizaciones se concederán previo informe preceptivo del Consell Insular de Mallorca.

12.4. Las escorias que no se puedan usar como materia prima secundaria se eliminarán en el vertedero controlado previsto en el epígrafe e) del artículo 11.1 del Pla Director Sectorial.”

La revisión del **2006** del PDSGRUM presenta en su Artículo 16: ***Tratamiento de las escorias procedentes de la incineración con recuperación de energía*** la normativa actual, donde no sólo se **contempla** la posibilidad de utilizar la escoria como materia prima sino que se promociona y fija el uso definitivo como tal. En su Artículo 16.1 se presentan sus aplicaciones:

“a) Recuperación de la parte metálica.

b) Utilización de la fracción mineral:

- i) Para el relleno de terraplenes y base inferior de carreteras.
- ii) Construcción de aparcamientos, calles urbanas y residenciales, caminos pavimentados y viales.
- iii) Como materia primera en la fabricación de cemento.
- iv) Como substituto de áridos para la fabricación de diferentes productos.

- v) Incorporación en la fabricación de elementos prefabricados (adoquines, ladrillos, bordillos,...).
- vi) Otros usos específicamente autorizados por el órgano competente para la utilización de los subproductos obtenidos.”

En lo referente a las composiciones químicas particulares que caracterizan medioambientalmente a la escoria, la normativa del 2000 no fijaba los valores en un rango de concentraciones concretas sino que trasladaba a la administración autonómica, previo informe preceptivo, la decisión última de permitir su uso con control periódico posterior, bajo condiciones desconocidas. Sin embargo la revisión del PDSGRUM del 2006, en el Artículo 16.1, cita que la normativa vigente aplicable es la propia de las materias primas a las cuales la escoria sustituye y por tanto sólo debe amoldarse a las prescripciones físicas y químicas de tales productos.

- **ORDRE de 15 de Febrer de 1996, sobre Valorització d'Escòries d'Incineració (nº 2181, Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya de data 13/3/1996)**

Pese a ser una orden catalana, es de aplicación para la planta de tratamiento de escorias (PTE) ya que la Evaluación de Impacto Ambiental de la PTE de los adopta como propios, por lo que es importante mencionarla.

La normativa catalana regula en su normativa los valores límites para que pueda valorarse la posibilidad de utilizar la escoria como producto reciclable, los límites de aplicación físicos y geológicos, además de ofrecer una caracterización y clasificación clara de las mismas y un protocolo de análisis y muestreo. Cabe destacar que los límites son para *valorar la posibilidad de utilizarse*, por lo tanto presupone nuevos trámites tras tal valorización.

- **La AAI, Autorización Ambiental Integrada.**

TIRME, S.A. posee la **AAI** (Autorización Ambiental Integrada) aprobada por la *Resolución de 23 de Mayo de 2007 del Conseller de Medi ambient* en la cual se establece la continuidad de los análisis realizados que permiten la calificación de la escoria como residuo no peligroso y su reciclaje según la legislación vigente y sin modificación de la AAI concedida.

La valorización de la escoria en la AAI se remite a la revisión del PDSGRUM del año 2006 cuyas características ya se han presentado.

- **Programa de Medidas y Vigilancia Ambiental, (PMVA) para las escorias**

El seguimiento ambiental del PDSGRUM en las instalaciones que gestiona TIRME, S.A. se lleva acabo a partir del **Programa de Medidas y Vigilancia**

Ambiental aprobado por *resolución de la Consellera de Medi Ambient de 30 abril de 2001 (BOIB Num.59. 17-05-2001)*. En su anexo I, el Programa de Medidas y Vigilancia Ambiental especifica el *control de los subproductos*.

- **Real Decreto 653/2003, sobre incineración de residuos.**

El **RD 653/2003** regula las bases en las que debe realizarse el proceso de incineración de residuos así como consideraciones y límites aplicables para los subproductos, las emisiones al agua y a la atmósfera.

Para las escorias de incineración define en su artículo especifica que “las instalaciones se explotarán de modo que se obtenga un grado de incineración tal que el contenido de carbono orgánico total (COT) de las escorias y las cenizas de hogar sea inferior al 3% o alternatively, su pérdida al fuego sea inferior al 5% del peso seco de la materia”.

- **Reglamento (CE) nº 850/2004** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, sobre contaminantes orgánicos persistentes y reglamentos sucesivos que modifican los anexos IV y V. del presente reglamento
- **Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008**, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
- **Orden ministerial de 6 de Febrero de 1976** por la que se aprueba el **Pliego de Prescripciones Técnicas Generales** para obras en carreteras y puentes, relativos a firmes y pavimentos y posteriores modificaciones (PG-3/75).
- **Orden Circular 8/2001 sobre reciclado de firmes. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales** para Obras de Conservación de Carreteras (**PG-4**).

III.4 Proceso de obtención de las escorias

La incineración de Residuos Urbanos (RU) es una componente importante de la gestión integral de RU, y es además una práctica común en muchos países occidentales. El proceso de incineración convierte los residuos en un flujo de gases calientes que deberán depurarse y dos subproductos: las escorias y los residuos de depuración de gases o cenizas. Aunque la cantidad de subproductos de incineración es muy baja comparada con el volumen total de RU incinerado, el conocimiento de las propiedades físicas y químicas de esos

subproductos es esencial en la toma de decisiones para el análisis de sus potenciales usos.

La Planta Incineradora con Recuperación de Energía de Son Reus (Palma de Mallorca) consigue, siguiendo las indicaciones de la Unión Europea, una reducción de volumen de los residuos en un 92% y permite una producción de energía eléctrica que supone aproximadamente el 10 % del consumo de Mallorca y Menorca. Los sistemas de depuración de gases y los continuos controles medioambientales aseguran que los valores de contaminación de las emisiones a la atmósfera se sitúan por debajo de los límites establecidos por la legislación europea y española.

Los subproductos obtenidos a partir de la incineración de RU (cenizas y escorias) suponen aproximadamente un 30% de la masa incinerada. En concreto, las escorias suponen el 90% de este porcentaje.

Dichas escorias están compuestas principalmente por óxido de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3) y óxido de calcio (CaO) con cantidades menores de otros óxidos (Mg, K, Na, S), las escorias tienen un alto contenido en sales y trazas de otros elementos (Sr, Zr, V, B, Rb, Li, Sc, Hg, Co, Pb, Zn, Ni, Sb, Mo, Cr, Cu, Cd, Sn, Mn). Macroscópicamente hablando se caracterizan por contener una mezcla heterogénea de metales, vidrio, árido, cerámica y una pequeña proporción de inquemados. Cabe destacar que es un residuo que no tiene la consideración de tóxico ni peligroso.

El tratamiento de la escoria se puede clasificar según los principios elementales del proceso llevado a cabo. Así los principios básicos de operaciones de separación química y física, son origen de muchos de los tratamientos realizados sobre la escoria: separación según tamaño, separación magnética, separación Eddy-Current, lavado, extracción química, precipitación química, intercambio iónico, adsorción, cristalización y evaporación son algunos ejemplos de procesos viables. También los métodos de estabilización como la solidificación hidráulica/cemento o la maduración-meteorización y los tratamientos térmicos de sinterización, vitrificación y fusión son usados normalmente en la **adecuación** de la escoria.

De todos los tratamientos mencionados algunos se llevan a cabo en la Planta de Tratamiento de Escorias de Son Reus. Tras un proceso de enfriamiento por una corriente de agua que consigue bajar la temperatura de las escorias que salen del horno, éstas se transportan mediante una cinta transportadora hasta su almacenamiento a la espera de su tratamiento posterior. El tratamiento se realiza en la planta de tratamiento de escorias donde se produce la separación magnética del material férreo y la separación por corrientes inducidas del material no férreo para la posterior reutilización. Paralelamente se realiza la separación y clasificación del árido en dos fracciones (0-8 mm y 8-20 mm) y la maduración final propia con carbonatación natural.

La maduración de la escoria se basa en procesos físico-químicos complejos destacando la carbonatación que ocurre naturalmente en la escoria como consecuencia de diversos factores como el pH, el potencial redox, las

condiciones de humedad y temperatura, así como la concentración de ciertos componentes atmosféricos como el CO_2 en el lugar de su emplazamiento como escoria fresca.

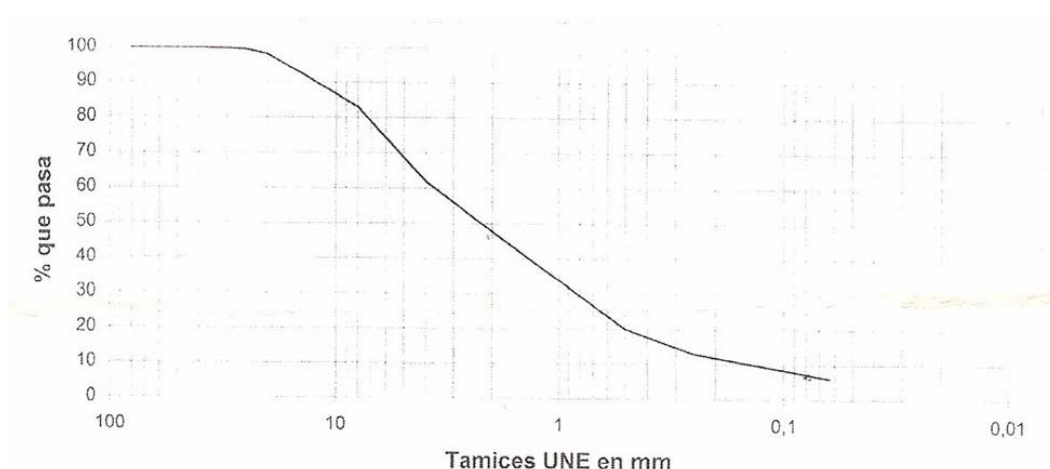
La carbonatación es una reacción de compuestos alcalinos inorgánicos con el CO_2 ocasionando la formación de carbonatos como la calcita. Debido a la naturaleza alcalina de la escoria este proceso ocurre naturalmente durante la exposición de la misma al CO_2 atmosférico ocasionando una reducción del pH hasta niveles alcalinos moderados alrededor de ocho y medio. Así se reduce la movilidad de los metales anfóteros para valores de pH cercanos a la neutralidad mediante una reducción de su solubilidad en el agua circulante que constituye el lixiviado. Paralelamente la carbonatación también conlleva la transformación hacia nuevas fases minerales, como la calcita misma y otros, que contribuyen a la inmovilización de los contaminantes.

III.5 Caracterización física y mecánicas de las escorias

La empresa TIRME, S.A. concesionaria de la gestión de los residuos urbanos de Mallorca, nos ha facilitado unas muestras representativas de las escorias producidas en la planta incineradora de Son Reus gestionada por ella misma y tratadas en la Planta de Tratamiento de Escorias. Es del interés de TIRME dar continuidad a nuevas investigaciones del comportamiento in situ de las escorias, ya que representa un material con un gran potencial para ser valorizable. Además se pretende, previa homologación, su introducción en bases de firmes de carreteras o aeropuertos rentabilizando su producción.

Se han realizado ensayos de caracterización para la fracción de las escorias 0-20 mm similares a los utilizados habitualmente en suelos granulares como los vistos previamente.

Tabla granulométrica del ensayo de las escorias:



Tamices UNE	80	50	40	25	20	8	4	2	0,5	0,25	0,063
% que pasa	100	100	100	99	98	83	62	48	20	13	6

Resumen de las propiedades más relevantes:

MEZCLA ESCORIAS 0/20	
Contenido en materia orgánica	0,93 %
Contenido en sales solubles	0,92 %
Contenido en yeso	6,1%
Limite liquido	-
Índice plástico	NP
CBR (95%) de compactación	66
CBR (100%) de compactación	92
Hinxaminetos	0,2%
Densidad Max(g/ml)	1,80
Humedad óptima (%)	14
Desgaste Los Ángeles	37

Para más información consultar el anexo M.

3.4 Incorporación de las escorias en la estructura de los firmes aeroportuarios

Dado que el paquete de firme consta de tres capas (rodadura, firme y subbase), el objeto de este trabajo es el estudio del comportamiento estructural del conjunto al substituir la subbase por una capa de escoria.

De esta forma, se conseguiría dar salida a un subproducto que actualmente no tiene aplicación alguna. Esto posibilitaría la distribución y comercialización, abaratando el proceso de tratamiento de residuos que actualmente supone un coste muy importante para el conjunto de población.

Una vez caracterizadas las escorias, primeramente deberíamos confirmar si cumplen la normativa de la F.A.A para su catalogación como subbase.

Lo clasificamos como Tipo I, ya que el tamaño máximo de las escorias es de 20mm. Las restricciones de este Tipo I, es que los elementos deben ser gruesos, estables y exentos de polvo y de partes descompuestas, condiciones que cumplen las escorias.

Taula 3.1. Composición granulométrica de suelos estables Tipo I

TAMIZ	%	Apto o No Apto
38,1 mm	100	Apto
25,4 mm	70-95	Apto
19,04 mm	55-85	Apto
Num. 4	30-60	Apto
Num. 10	20-50	Apto
Num. 20	10-30	Apto
Num. 200	5-15	Apto
Arcillas	0-5	Apto

Además deberán cumplir las condiciones siguientes:

1. El tanto por ciento que pasa por el tamiz 200 será menor que la mitad de lo que pasa por el tamiz 40.

$7 < 19/2$ CUMPLE

2. El límite líquido de los materiales que pasan por el tamiz 40 será menor que 25.

CUMPLE al ser un material no plástico.

3. El índice de plasticidad será menor que 6.

CUMPLE al ser un material no plástico.

4. El árido de mayor dimensión en cada capa no será superior a los $\frac{2}{3}$ de espesor de la capa.

$$3,5 \text{ cm} < \frac{2}{3} \cdot 31 \text{ cm} \quad \text{CUMPLE}$$

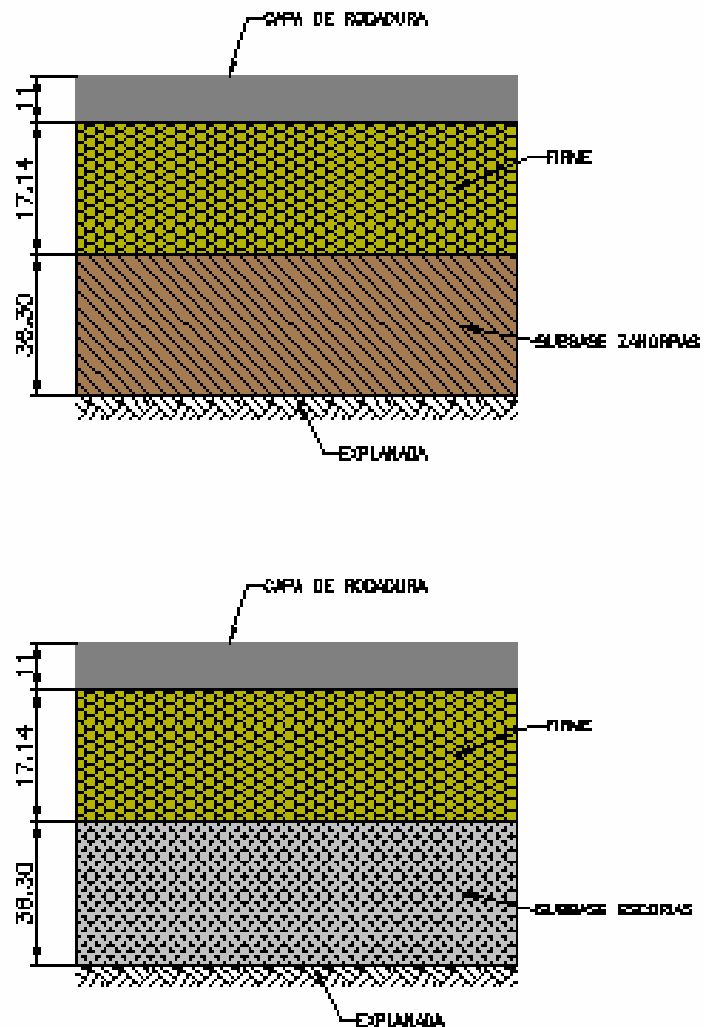


Fig 3.1 Substitución capa zahorras por escorias

IV CAPITULO. Comprobación de la idoneidad de las escorias en los firmes aeroportuarios.

IV.1 Análisis estructural del problema

El objetivo de este trabajo, es comparar el comportamiento del paquete estructural del firme en las siguientes dos alternativas:

- a) Paquete estructural convencional
- b) Paquete estructural sustituyendo una de las capas por escorias.

La capa de escorias a sustituir, podría ser la correspondiente a lo que hemos denominado subbase. Dado que las escorias contienen metales pesados y un alto contenido en yesos (3,76%), aparte de otros materiales inadecuados, se ha pensado que la ubicación más conveniente, sería en las capas profundas del paquete estructural, concretamente la capa de subbase.

El paquete estructural es una estructura multicapa cuyo comportamiento resistente viene determinado por los módulos de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν), de las diferentes capas que lo conforman.

Por tanto los criterios de aceptación para el dimensionamiento de las capas del firme, es decir, evaluar el espesor necesario de las capas, se determina mediante el estudio del estado tensional y deformaciones producidas por una carga tipo.

Existe un amplio número de programas que resuelven las ecuaciones diferenciales que determinan los estados tensionales del paquete estructural. En ese proyecto hemos elegido el programa GID versión 10.05.

La procedencia de los materiales estudiados en este trabajo, es:

- Zahorras-Cantera Es Pagos.
- Escorias-Empresa concesionaria de tratamiento de residuos TIRME S.A.

Los ensayos (ver Anexo H y I) corresponden a la caracterización del material (granulometría, plasticidad...) pero no aportan información sobre sus características resistentes tales como son el modulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, que determinaremos en el laboratorio.

El resto de las capas del paquete estructural (aglomerado asfáltico, firme y explanada natural E-2) se obtendrán simulando un caso estándar convencional. Para ello se ha considerado tanto los espesores como las características de las capas de aglomerado, grava cemento y explanada invariables. Por tanto, queda como variable el modulo de elasticidad de la capa de cimient.

Por otro lado, cogeremos los espesores sin estabilizar de la subbase ya que el hecho de estabilizar las escorias introduce una complejidad que no es objeto de este estudio.

Taula 4.1. Paquete estructural Flexible

Material	Modulo elástico (MPa)	Coefficiente Poisson	Espesores sin estabilizar (cm)	Tensiones admisibles (KPa)	Peso especifico kg/m3
Aglomerado asfaltico	10.000	0.25	11	1500	2300
Grava cemento	15.000	0.20	24	1200	2100
Zahorras artificiales	463	0.35	36,3	408	1600
Explanada E-2	100	0.40	-	150	1800

[Datos extraídos de la normativa 6.1-IC y 6.2-IC para firmes]

Siguiendo un proceso totalmente análogo, se estudiara el paquete estructural siguiente que corresponde a un firme rígido:

Taula 4.2. Paquete estructural Rígido:

Material	Modulo elástico (MPa)	Coefficiente Poisson	Espesores sin estabilizar(cm)	Tensiones admisibles (KPa)	Peso especifico kg/m3
Hormigón	25.000	0.12	38,1	3052	2400
Zahorras artificiales	463	0.35	22	408	1600
Explanada E-2	100	0.40	-	-	1800

[Datos extraídos de la normativa 6.1-IC y 6.2-IC para firmes]

Existen diferentes tensiones a considerar:

1. La tensión de rotura es la mínima tensión que produce la rotura de un material.
2. Tensión admisible es la máxima tensión a la que un material de construcción debe trabajar en obra.
3. Tensión de trabajo es la tensión a la que está sometido en obra.

Cogeremos la tensión admisible, puesto que al sobrepasar la tensión admisible se producen deformaciones incompatibles con el buen funcionamiento.

Dividiendo las tensiones admisibles de cada material por las tensiones encontradas con la ayuda del programa GID, obtenemos los coeficientes de seguridad para cada una de las capas del firme. En principio, se han tomado los mismos espesores para la capa de escorias que para la subbase convencional.

En este estudio, no se han considerado otros factores como el de fisuración por fatiga.

IV.2 Ensayo para la obtención de los módulos elásticos

IV.2.1 Introducción

Para obtener el modulo de elasticidad se han ido afinando los procedimientos debido a la dificultad que comporta la realización física de estos ensayos.

Primeramente, se pensó en un ensayo de compresión para sacar el modulo elástico. No obstante, para su realización era necesario mezclar las zahorras con un betún. Este hecho distorsionaría el resultado, obteniendo un modulo elástico muy superior al real, debido al betún. Por eso mismo se descarto su empleo.

Posteriormente se pensó en tomar un testigo, pero esta opción también quedo descartada debido a la imposibilidad de la obtención de dicho testigo por el desmoronamiento de la muestra debido a la falta de cohesión y confinamiento.

Esta falta de confinamiento la podríamos subsanar mediante un ensayo triaxial confinado. Debido a la complejidad y el coste que representa su realización se ha pensado en otro método más sencillo y económico denominado pulso de ultrasonido que se describe en el apartado 4.2.4.

Agradecer la colaboración del Departamento Técnico de Geotecnia del Campus Nord por su paciencia y a su amabilidad al permitir realizar éstos ensayos.

IV.2.2 Preparación de la muestra

En el Anexo H e I, pueden verse las curvas granulométricas obtenidas para:

- Zahorras artificiales procedentes de Es Pagos.
- Escorias procedentes de la incineradora de la Planta de TIRME.

Además de las características físicas y químicas obtenidas, también disponemos del ensayo Proctor Modificado para cada material. Anexo H.1 y I.1.

La curva densidad-humedad de las zahorras tiene la clásica forma de campana con una densidad máxima de 2,33 (g/ml), correspondiente a una humedad del 7,5%.

En la curva densidad-humedad de las escorias apreciamos que la curva es mucho más plana, lo que indica que la densidad del material es poco sensible a la humedad. Aun así, puede apreciarse un máximo relativo para una humedad del 15% siendo la densidad máxima de 1,8 (g/ml).

En la preparación de la muestra para posteriormente ensayar-lo en un pulso de ultrasonido, hemos añadido la cantidad de agua correspondiente a la humedad óptima obtenida en el ensayo Proctor, simulando así las condiciones normales que se producen en obra, puesto que los pliegos de condiciones exigen para estas capas el 100% de la densidad obtenida en el Proctor Modificado.

Procedimiento

Hemos tomado una muestra de 3kg y la hemos tamizado por la malla Núm. 4.



Fig 4.1. Tamización de las escorias



Fig 4.2. Zahorras ya tamizadas

Material utilizado

Hemos compactado este suelo en un molde metálico de 70mm de diámetro y 140mm de altura, en tres capas con 26 golpes por capa de un martillo de compactación de 24.5N con una altura de caída de 30cm. Con todo esto, la energía de compactación por unidad de volumen es de 593.7 kJ/m^3 .

Preparación de la muestra

El primer día sacamos una muestra para calcular la humedad del material, la metimos en el horno a una temperatura 110 °C.

Muestra escoria 23/06/2011	
T+s+a	171,42g
T+s	169,26g
T	58,98g

Muestra zahorras 20/06/2011	
T+s+a	332,82g
T+s	328,1g
T	100,10g

T= Peso del molde

T+s+a= Peso de la muestra con agua

T+s= Peso muestra en seco

Luego proseguimos en desmenuzar el material, ya que las escorias eran de un tamaño mayor que el permitido (0-20mm), por tanto, tamizamos el material por el tamiz 12,7mm (0,5 pulgada). Las zahorras tenían un tamaño adecuado para la realización del Proctor.

Procedimiento:

1. El primer paso fue medir el peso del molde sin el material
 $P_{\text{Molde}} = 9,756\text{kg}$.
2. Seguidamente pusimos una membrana en el molde del Proctor para que la muestra quedase sujeta después de retirar el molde de hierro. El peso de la membrana es de 20,54 g.
3. Añadimos agua al material para llegar al 15% de humedad óptima de las escorias y en el caso de las zahorras hasta llegar al 7,5%.



Fig 4.3. Material + Agua

4. Hemos colocado una primera capa en el molde (de 1/3 de altura total una vez compactado) y lo hemos apisonado con 26 golpes. El proceso se repite tres veces hasta conseguir la altura total.
5. El peso total de la muestra (sin membrana) depende de la humedad considerada, y la llamaremos $P_{TE} = 968g$ y $P_{TZ} = 1185g$
6. Posteriormente hemos retirado el collar y hemos enrasado la muestra.

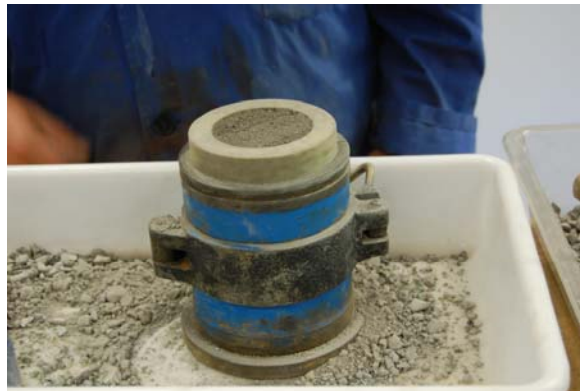


Fig 4.4 Proctor zahorras



Fig 4.5 Proctor escoria



Fig 4.6. Proctor

Cálculos

Ahora ya estamos en condiciones de calcular la densidad seca mediante la fórmula siguiente.

$$\rho_Z = \frac{P_s}{V} = \frac{P_{TZ}}{\pi \cdot r^2 \cdot h} = 2,20 \text{ g/ml} \quad (4.1)$$

$$\rho_E = \frac{P_s}{V} = \frac{P_{TE}}{\pi \cdot r^2 \cdot h} = 1,79 \text{ g/ml} \quad (4.2)$$

Siendo:

$r_{\text{radio del cilindro}} = 35\text{mm} = 0,35\text{dm}$

$h = 140\text{mm} = 1,4\text{dm}$

La densidades encontradas se asemejan mucho a las que teníamos de referencia (1,8 y 2,33), por tanto las damos por buenas las muestras.

IV.2.3 Pulso de ultrasonido

Existen varios tipos de equipos de ultrasonido, pero en lo común poseen un receptor y un emisor capaces de marcar el tiempo de propagación de una onda a través del material.

Cuidadosamente se pone la muestra que se va a ensayar entre los dos transductores. Se tomarán tres lecturas como mínimo, anotando el tiempo de propagación de la onda en la muestra y la distancia entre transductores o terminales; estas distancias no deben exceder de 400 mm y se recomienda que sean lo más constantes posibles para asegurarse de que las lecturas obtenidas sean uniformes.

Una vez que la onda se transmite a través del material, es captada por el transductor receptor. Se obtendrá el tiempo de propagación de la onda en el material que, junto con la distancia entre transductores, nos ayudará a saber la velocidad en que se ha transmitido el pulso.

Se debe asegurar que los transductores tengan un buen acoplamiento sobre la superficie de la muestra. Esto se logra enrasando bien las dos capas externas.

Durante la ejecución deberemos:

- Procurar no moverlos, ya que se puede generar ruido y consecuentemente lecturas erróneas.
- Mantener firmes los transductores hasta que la lectura sea definida.

Proceso de calibración del equipo

Primeramente calibraremos el instrumento. Lo haremos poniendo los dos transmisores uno encima del otro, y observando que el tiempo de propagación del pulso es de 0µs. Esta operación se efectuará al iniciar las mediciones y se repetirá en operación de duración de más de una hora.

El equipo proporciona grandes ventajas, entre ellas podemos mencionar su poco peso, fácil uso y manejo.

Presenta como desventaja, que los cables transmisores en varias ocasiones presentan falsos contactos debido al exceso de movimiento, con lo cual se dificulta efectuar las lecturas.



Fig 4.7. Pulso de ultrasonido en la muestra de escorias

IV.2.4 Resultados

Ahora ya tenemos todos los datos para calcular el modulo elástico;

$$E = \rho * v^2 \quad (4.2)$$

$$\text{Velocidad de Pulso} \left(\frac{\text{Km}}{\text{seg}} \right) = \frac{\text{distancia entre transductores (cm)} \cdot 10}{\text{tiempo} (\mu\text{s})} \quad (4.3)$$

La densidad corresponde a la calculada en el apartado 4.2.2, es decir $\rho_E=1,75$ y $\rho_Z=2,3$.

Lógicamente la densidad obtenida para las escorias es menor que la correspondiente a las zahorras, debido a la mayor uniformidad en el tamaño que permite un mayor índice de huecos y a su naturaleza de menor densidad.

$$E_z = \rho * v^2 = 2,30 \cdot (14,18^2) = 463 \text{ MPa}$$

Otros autores consideran que el modulo elástico puede calcularse empíricamente por la formula $E= \text{CBR} \cdot 10$. En nuestro caso si realizamos este

cálculo obtendremos $E = 670 \text{ MPa}$, que aunque similar al anterior nos parece algo excesivo.

De manera análoga, se realizó el pulso de ultrasonido para las escorias, sin obtener ningún resultado. Pensamos que probablemente al ser un material heterogéneo con diferentes densidades, la onda se dispersa sin que sea posible ninguna medición.

Por tanto se procedió al ensayo edométrico como se explica a continuación.

IV.2.5 Ensayo edométrico de las escorias

El ensayo edométrico se utiliza para calcular la compresibilidad unidimensional del suelo. La compresibilidad o deformación dependerá en todo momento del módulo elástico del material. Siendo el módulo más grande cuanto más pequeña sea la deformación.

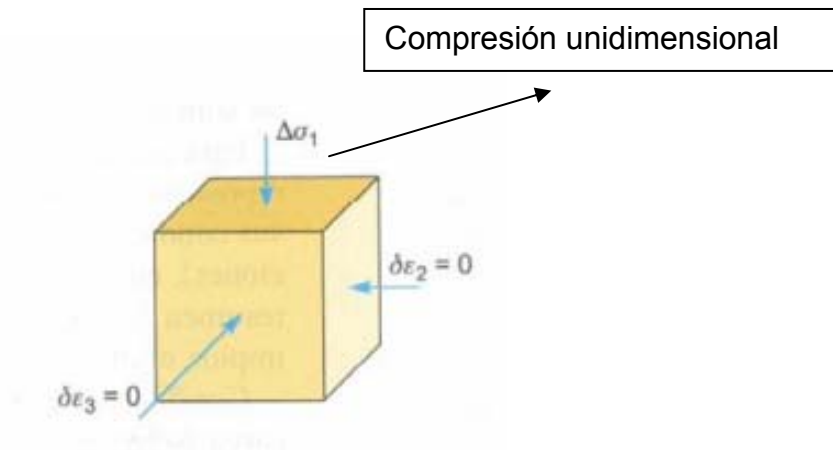


Fig 4.8. Material sometido a una carga de compresión

Se aplicara una carga de forma escalonada de 10/20/30 kg. La diferencia de carga no debe ser muy grande para no perturbar la estructura del suelo, normalmente cada escalón duplica la presión vertical del anterior.

Lo que mediremos será lo que se comprime o asienta la probeta de escoria con un determinado tiempo en cada escalón. Lo mediremos en un comparador (reloj) que mide los microsegundos.

Preparación de la muestra

Realizando el Proctor otra vez para las escorias tal y como se describe en apartados anteriores, pondremos la muestra en el molde metálico para que ésta pueda tener un confinamiento lateral y así evitar el desmoronamiento lateral al aplicar la carga.

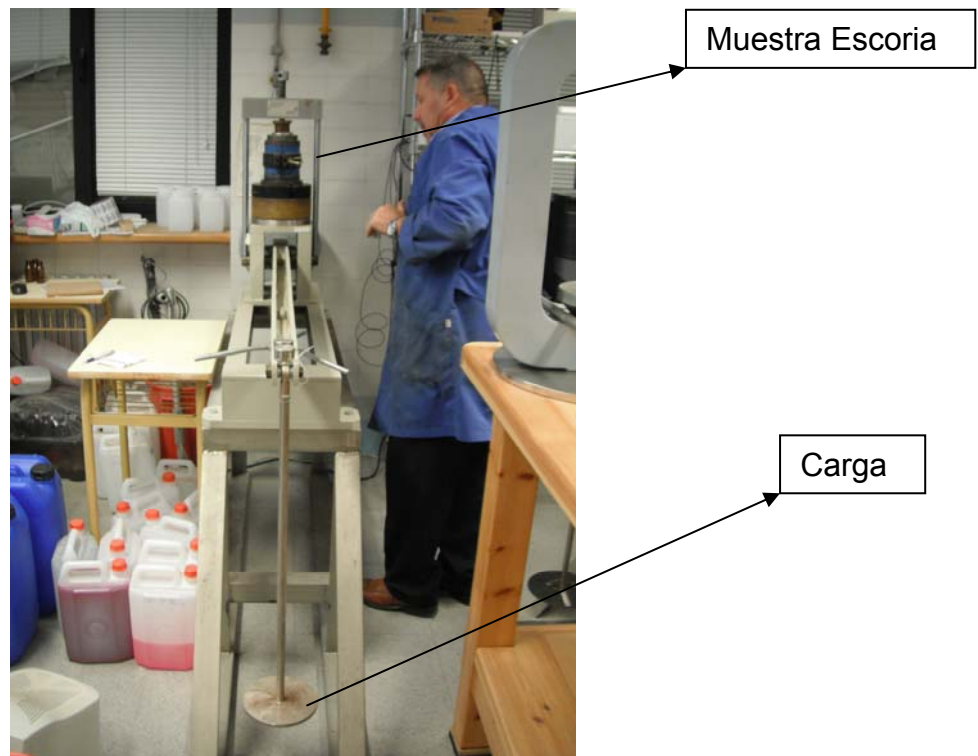


Fig 4.9. Edómetro

La relación de carga es 1:20. Esto quiere decir que cuando aplicamos una carga de 10 kg tendremos que el pistón aplicara una tensión a la muestra de $51968,9 \text{ kg/m}^2$. Mientras que si aplicamos una carga de 20kg tendremos una tensión de compresión de $103\,938 \text{ Kg/m}^2$.

En el Anexo K podemos ver la toma de datos del ensayo edometrico de las escorias.

La serie de datos que haremos servir para calcular el módulo, serán los correspondientes a la descarga, ya que es donde el material se enchansa según sus características. El módulo de Young es la relación entre la tensión y deformación, cuando estamos en la rama elástica. Si descargamos se recupera la deformación. Solo en esta rama elástica podemos calcular el módulo de Young.

Al comienzo de un escalón la velocidad de asentamiento es máxima. Con el tiempo el suelo se consolida por completo y la aguja del comparador se estabiliza.

Como ya hemos dicho cogeremos las muestras correspondientes a la descarga, donde el módulo de elasticidad será la pendiente de la grafica tensión-deformación.

Tabla 4.3. Datos de la muestra ensayada en el edómetro

Tensión (MPa)	Delta desplaz(μm)	Def. vol	E=delta sigma / delta def (MPa)
1,56 (30kg)			
1,04 (20kg)	19	0,00013571	3831,578947
0,52 (10kg)	39	0,00027857	1866,666667

**Fig 4.10.** Muestra ensayada en un edómetro

Los módulos aumentan según la tensión aplicada, creciendo proporcionalmente. Cogemos el más pequeño, 1866,6 MPa, poniéndonos en el caso más desfavorable.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} = 0,9 \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = 0,9 \cdot 1866,6 = 1679,4 \text{ MPa}$$

Si comparamos el módulo obtenido con la formula empírica general $E = \text{CBR} \cdot 10$, tomando el CBR para la humedad óptima (correspondiente a $w_E = 1,8 \text{ g/cm}^3$) obtenemos:

$$E = \text{CBR} \cdot 10 = 98,3 \cdot 10 = 980 \text{ MPa}$$

Aunque los resultados son del mismo orden de magnitud, consideraremos un valor intermedio:

$$E_f = 1200 \text{ MPa}$$

IV.3 Superficie de repartición de cargas

La superficie de contacto del neumático de la rueda del avión con el suelo es aproximadamente una elipse, cuya superficie depende de la presión del neumático y de si la carga sobre el suelo actúa de una manera estática (rodadura) o dinámica (impacto en el aterrizaje).

Para mayor facilidad en los cálculos se sustituye esta superficie de carga por otras rectangulares en la que el lado mayor es algo inferior al doble del menor.

La repartición de las cargas entre las diferentes partes del tren dependerá de la posición del centro de gravedad del avión. Como resultado de la experiencia en los casos más desfavorables en las ruedas gemelas puede alcanzar la carga en cada neumático el 35% del peso total del avión. Puesto que queremos obtener un coeficiente de seguridad, cogeremos el caso más desfavorable.

$$W_c = 0,35 \cdot 73500 = 25\,725 \text{ kg} \quad (4.4)$$

IV.3.1 Clasificación de pavimento por su resistencia. Carga por rueda simple equivalente-Núm. L.C.N

Podemos definir las características de los pavimentos por su resistencia calculando la carga por rueda simple aislada que puede soportar, relacionada con una determinada presión de neumáticos.

Este procedimiento fue adoptado por la OACI, clasificando los pavimentos por los números de clasificación LCN, es decir por su resistencia. Existe una relación general entre la carga de rotura de un pavimento y el área de contacto sobre la que se aplica.

Sí miramos en la grafica extraída de los ábacos de la FAA, el LCN correspondiente a nuestra aeronave tipo;

(L, C, N.)	CARGA POR RUEDA SIMPLE	PRESION DE NEUMATICO
100	45.400 kg. (100.000 libras)	8,44 kg/cm ² (120 libras/pulgada cuadrada)
90	40.800 kg. (90.000 libras)	8,09 kg/cm ² (115 libras/pulgada cuadrada)
80	36.300 kg. (80.000 libras)	7,74 kg/cm ² (110 libras/pulgada cuadrada)
70	31.800 kg. (70.000 libras)	7,38 kg/cm ² (105 libras/pulgada cuadrada)
60	27.200 kg. (60.000 libras)	7,03 kg/cm ² (100 libras/pulgada cuadrada)
50	22.700 kg. (50.000 libras)	6,68 kg/cm ² (95 libras/pulgada cuadrada)
40	18.100 kg. (40.000 libras)	6,33 kg/cm ² (90 libras/pulgada cuadrada)
30	13.600 kg. (30.000 libras)	5,98 kg/cm ² (85 libras/pulgada cuadrada)
20	9.100 kg. (20.000 libras)	5,62 kg/cm ² (80 libras/pulgada cuadrada)
10	4.500 kg. (10.000 libras)	5,27 kg/cm ² (75 libras/pulgada cuadrada)

Fig 4.11. Cálculo del L.C.N según la carga por rueda simple

L.C.N= 55.

En los pavimentos rígidos se efectuaron los ensayos aplicando cargas en el centro y en las esquinas de las placas. En los pavimentos flexibles se considero como carga de rotura la que daba lugar a una deformación de 2,54 mm. Se llegó así a obtener las curvas que se representan a continuación que relaciona, para pavimentos rígidos y flexibles, las aéreas de contacto.

IV.3.2 Área de contacto

Se deduce o bien gráficamente o de manera más exacta con la formula, con una presión de neumático: 6,90 kg/cm².

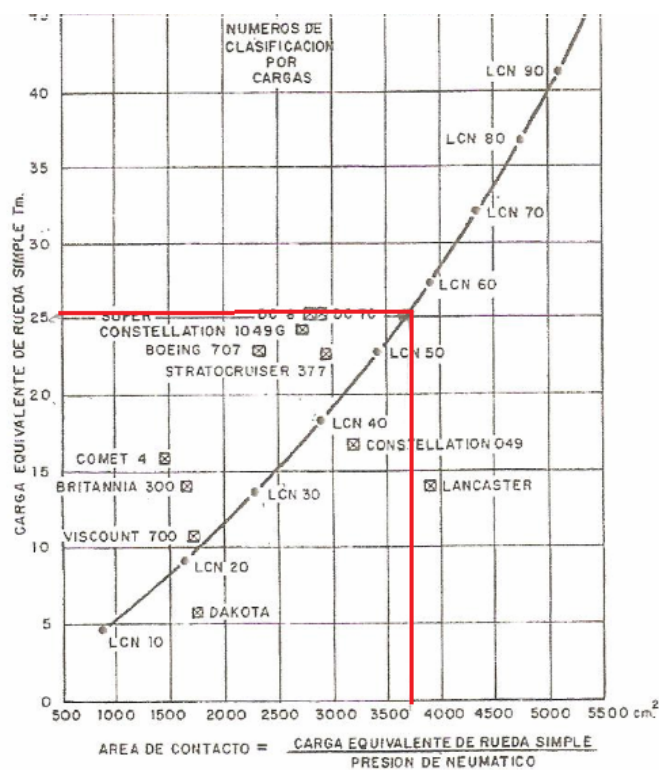


Fig 4.12. Calculo área de contacto gráficamente

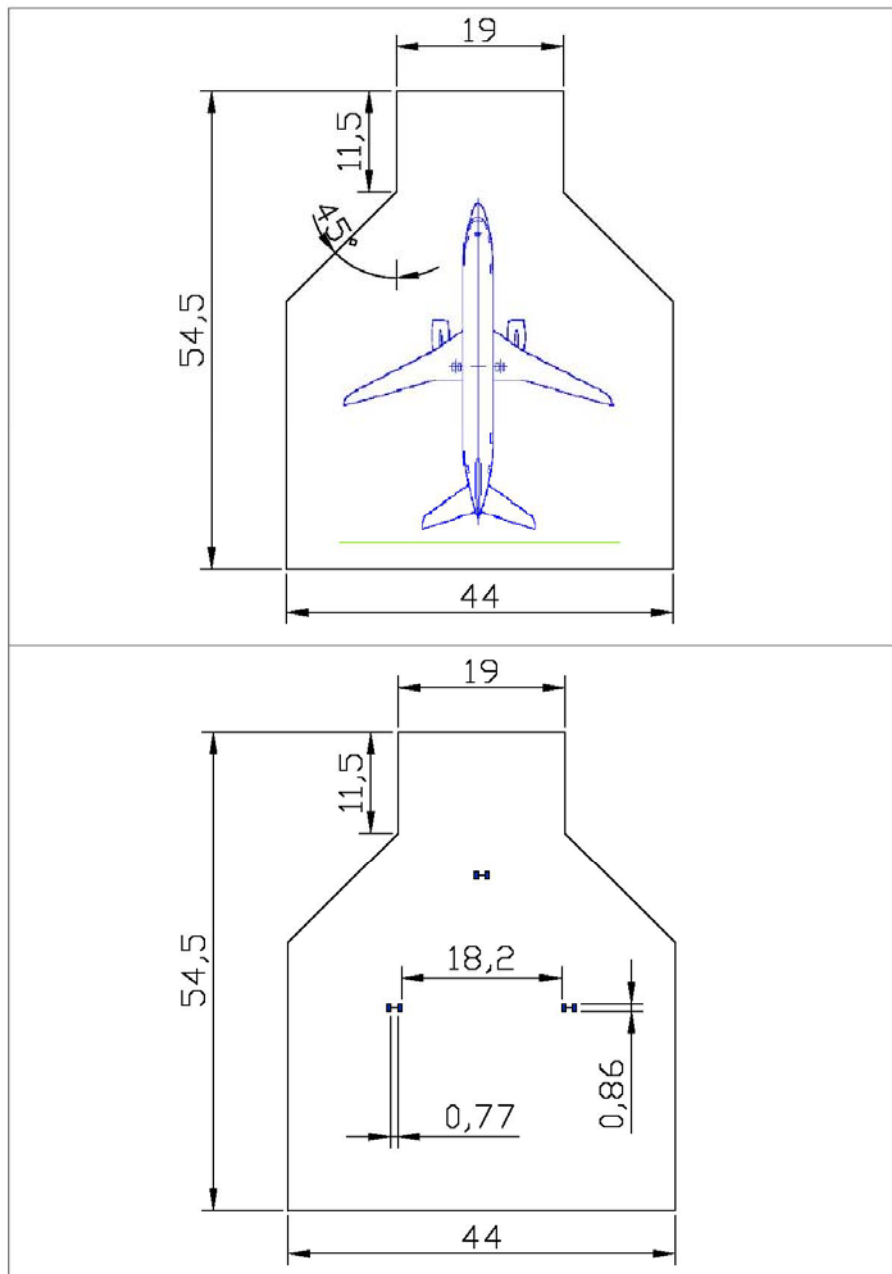
$$\text{Área de contacto} = \frac{\text{carga equivalente rueda simple}}{\text{presión de neumático}} = 3728,26 \text{ cm}^2 = 0,373 \text{ m}^2 \quad (4.5)$$

Teniendo en cuenta las especificaciones del área rectangular cogemos x= 0,43m e y= 0,86m.

De este modo, conocido el L.C.N, podemos obtener todas las combinaciones de carga equivalente por rueda simple/presión de neumático que puede soportar el pavimento tanto si es rígido o flexible.

Mirando las dimensiones del A320 en el ACAP (Aircraft Characteristic Airport Planning) tenemos la distribución de cargas repartidas adecuadamente por la superficie de estacionamiento.

A continuación vemos el stand de estacionamiento del A320, con sus dimensiones. Con soporte del Autocad 2008, hemos marcado las áreas calculadas anteriormente donde calcularemos las tensiones máximas soportadas por el pavimento.



Escala 1:500

IV.3.3 Comprobación de los espesores con el método L.C.N.

En el capítulo 1, hemos calculado los espesores tanto de los pavimentos flexibles y rígidos a través del método de la FAA, es decir mediante el análisis del índice del C.B.R del terreno natural, subbase y firmes.

Hay otros métodos de cálculo como son:

- Método C.B.R
- Método McLeod.
- Método L.C.N

En este apartado comprobaremos que los resultados obtenidos mediante el método de C.B.R se corresponden a los resultados con el método L.C.N.

Si miramos la gráfica con el L.C.N obtenido para una carga por rueda y presión de neumáticos, podemos ver el espesor del pavimento en cm. La curva de L.C.N permite generalizar el cálculo para cualquier tipo de tren de aterrizaje.

Estos gráficos muchas veces son recomendados por industrias constructoras de aviones.

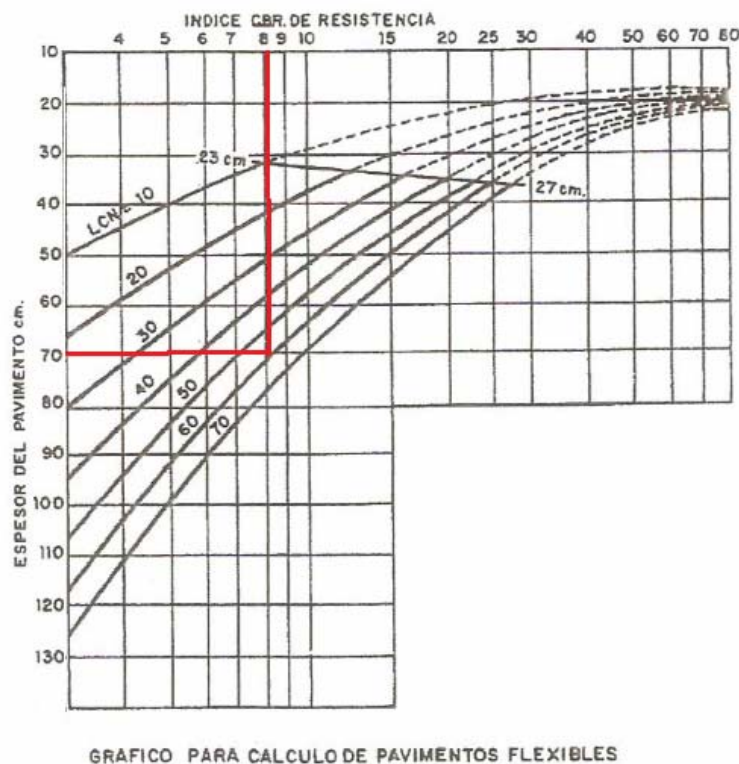


Fig 4.13 Espesor total del pavimento según el método L.C.N

Para un CBR=8 y un LCN= 55 (calculado en el apartado anterior) obtenemos un espesor de 70 cm en pavimentos flexibles.

Si lo comparamos con los resultados obtenidos con el método CBR (71,3 cm) vemos que solo hay una diferencia del 1,8%, por tanto lo podemos dar por bueno.

V CAPÍTULO. Comprobación de las secciones con el método de elementos finitos

Los programas utilizados son el GID, que permite dibujar la estructura del stand de estacionamiento de la aeronave tipo. Y a través del módulo Calsef 2001, realizaremos el Post Proceso, aplicando las cargas y el análisis de éstas.

A continuación se estudiara primeramente el paquete estructural convencional y posteriormente el paquete estructural substituyendo la subbase por una capa de escorias (cambiando el modulo elástico calculado en el capítulo 4).

En motivo de las grandes dimensiones del rectángulo y de los espesores tan pequeños, a la hora de hacer el mallado no podemos obtener unos resultados cien por cien coherentes. Por eso estudiaremos el mismo problema pero cogiendo un corte transversal, concretamente el corte que pasa por el centro del área de contacto del tren principal, por tanto será un estudio en 2D. En el Anexo J encontramos la estructura en 3D.

Por último compararemos los resultados de las tensiones normales soportadas por nuestro avión tipo en cada capa y calcularemos los márgenes de seguridad que nos permitirán establecer.

V.1 Pre Proceso paquete convencional

Como ya se ha dicho anteriormente se utiliza el programa GID para realizar la modelización de la estructura y en este caso cargaremos el modulo Calsef 2001 [Estado Plano] para calcular los datos que nos interesan.

V.1.1 Superficies y volúmenes

Como se observa en la figura 5.1, se puede ver la estructura de la sección trasversal según sus partes. Las líneas de color azul representan la estructura en sí, a partir de ellas se crean las superficies, de color lila. Tendremos 4 superficies correspondientes a los 4 espesores de las capas. En este caso no tendremos volúmenes ya que estamos trabajando en 2D.

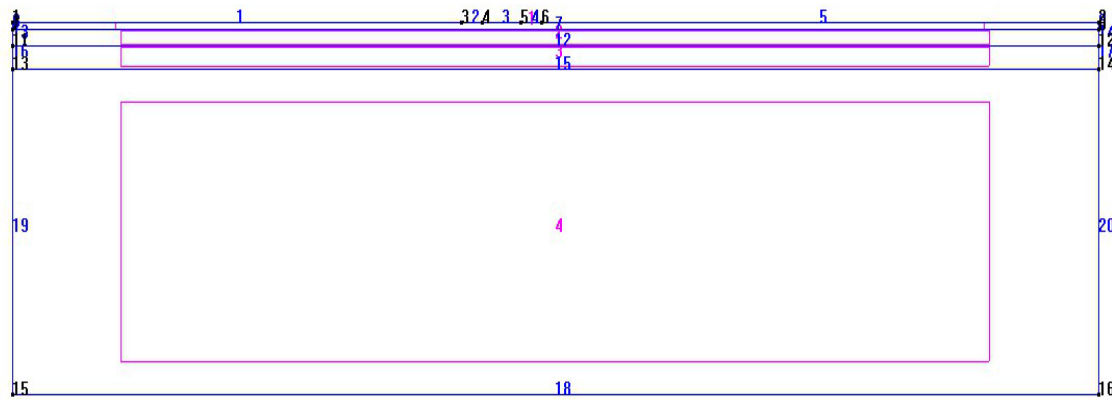


Fig 5.1. Geometría stand de estacionamiento aeronave tipo, A320

V.1.2 Malla

Se crea una malla No-Estructurada de tamaño de los elementos correspondiente a 0,05.

Hemos tenido algunos problemas al generar la malla, ya que la intención era conseguir que hubiese 4 triángulos en la capa de rodadura, para obtener unos resultados más reales. Por eso hemos que tenido que reducir tanto el tamaño de los elementos.

Número de elementos triangulares=113942

Número de nodos=57526

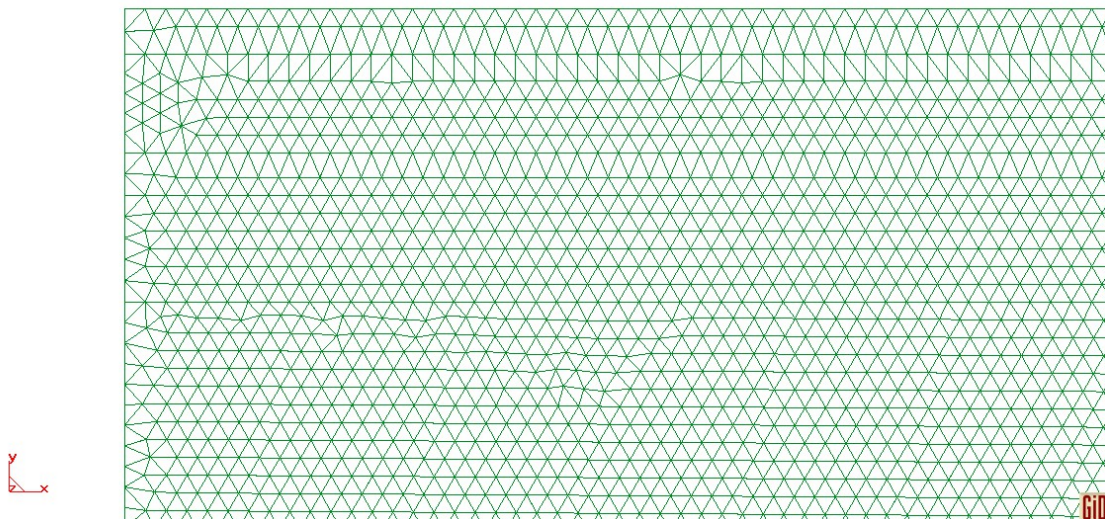


Fig 5.2. Malla

V.1.3 Condiciones de contorno y propiedades mecánicas

Para poder realizar los cálculos necesarios de las tensiones generadas en la sección se utiliza el módulo Calsef 2001 dentro del GID.

V.1.3.1 Asignación de desplazamientos fijos

En este caso solo tenemos dos tipos de restricciones, puntuales y lineales quedan exentas las de superficie. En este caso se asigna una restricción de desplazamiento en distintas líneas.

Se asigna una restricción de desplazamiento en las líneas paralelas al eje X (color verde), mientras que se asigna una única restricción en la línea inferior (núm. 18) en el eje Y (color amarillo).

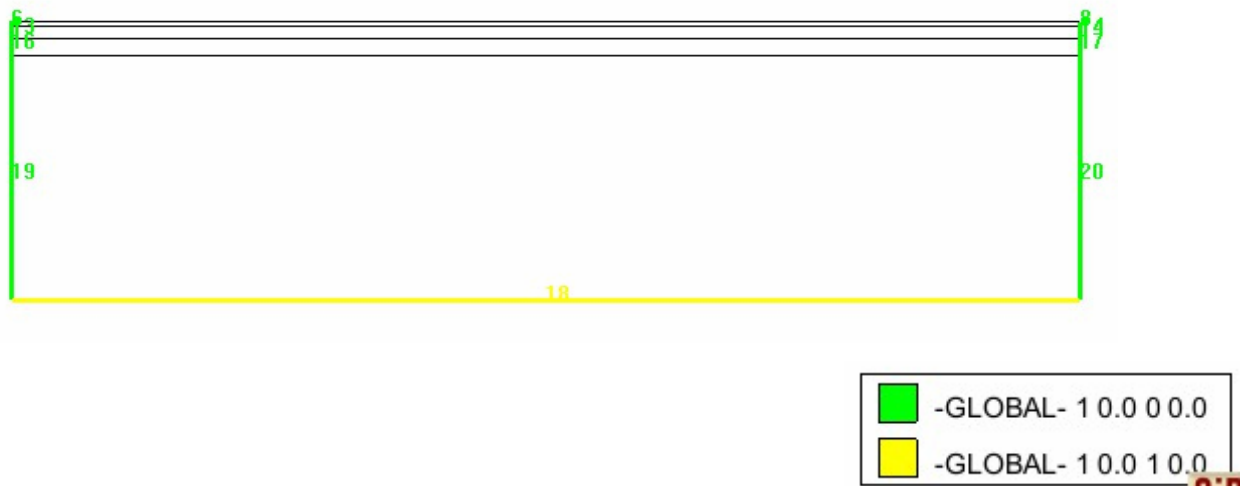


Fig 5.3. Superficies restringidas

V.1.3.2 Aplicación de cargas

Para poder analizar el comportamiento de la estructura, se aplican cargas uniformes normales al eje Y en las líneas 2 y 4 que tienen una longitud de 0,43 como se calculo al categorizar el área de contacto.

La presión normal que aplicaremos es la correspondiente a la carga por rueda simple en el caso más desfavorable (25 725 kg) dividido por una área de 0,87x1m. Como podemos observar las tensiones serán mucho menores que en el caso del 3D.

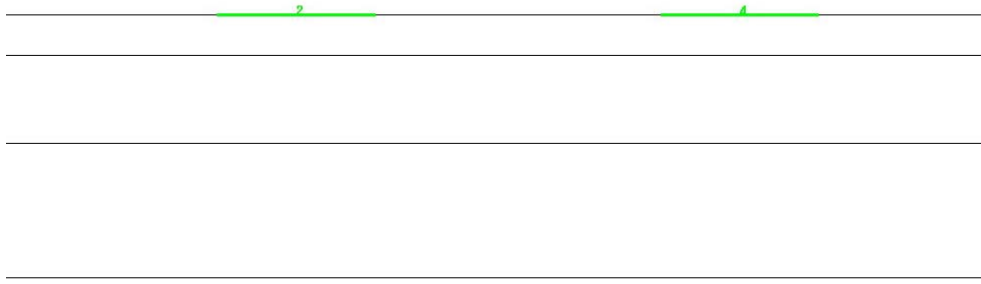


Fig 5.4. Líneas de aplicación de las cargas

29568 0,0

V.1.3.3 Asignación material

El material será diferente según la capa. A continuación se citan los materiales con sus propiedades, desde la capa de más arriba a la de abajo.

Rodadura

- Módulo de Young: $5 \cdot 10^9$ N/m²
- Coeficiente de Poisson: 0,25

Firme

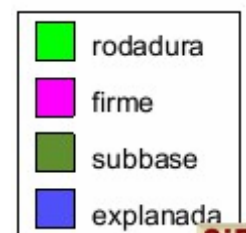
- Módulo de Young: $15 \cdot 10^9$ N/m²
- Coeficiente de Poisson: 0,25

Subbase

- Módulo de Young: $463 \cdot 10^6$ N/m²
- Coeficiente de Poisson: 0,3

Explanada

- Módulo de Young: $100 \cdot 10^6$ N/m²
- Coeficiente de Poisson: 0,4



V.2 Post Proceso paquete convencional

En el post proceso se pueden ver las consecuencias de la aplicación de la carga una vez realizado el cálculo. Se puede ver la deformación sufrida en la estructura, los desplazamientos causados, así como también las tensiones que aparecen en toda la estructura.

V.2.1 Deformación

Como se puede observar en la imagen siguiente, las cargas aplicadas causan una deformación por igual en las dos superficies de contacto en el sentido de la aplicación de la carga (-y).

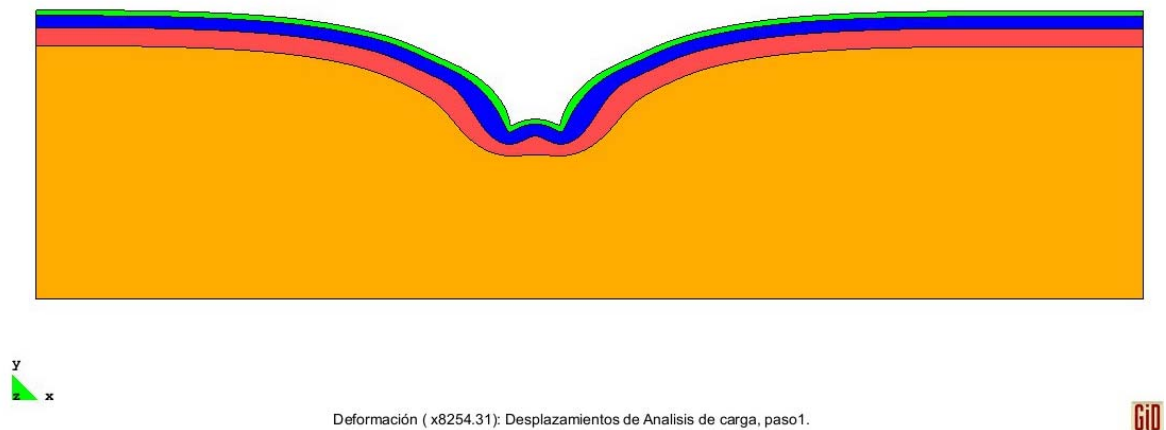


Fig 5.5. Deformación total

En la imagen Fig 5.6 podemos ver la deformación ocasionada con sus respectivos desplazamientos totales.

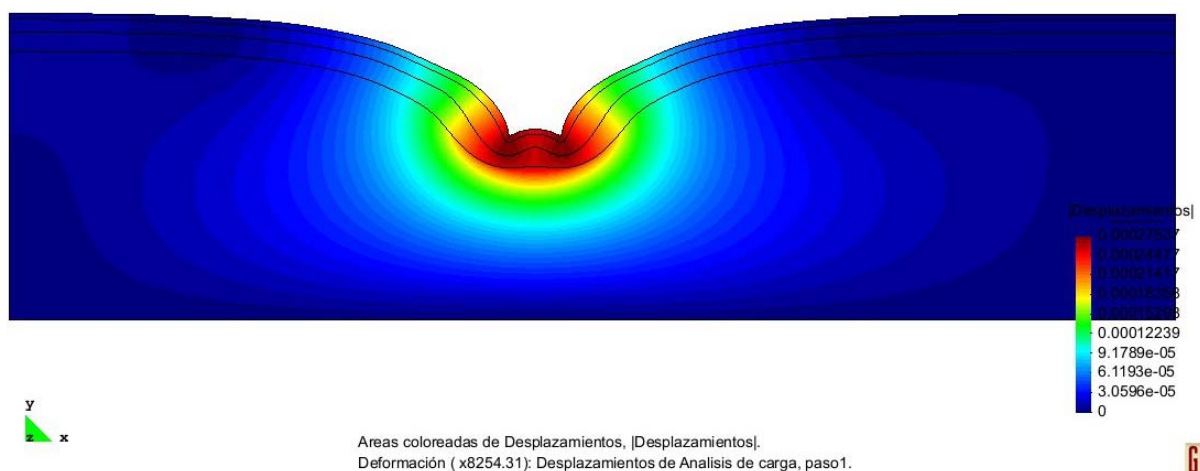
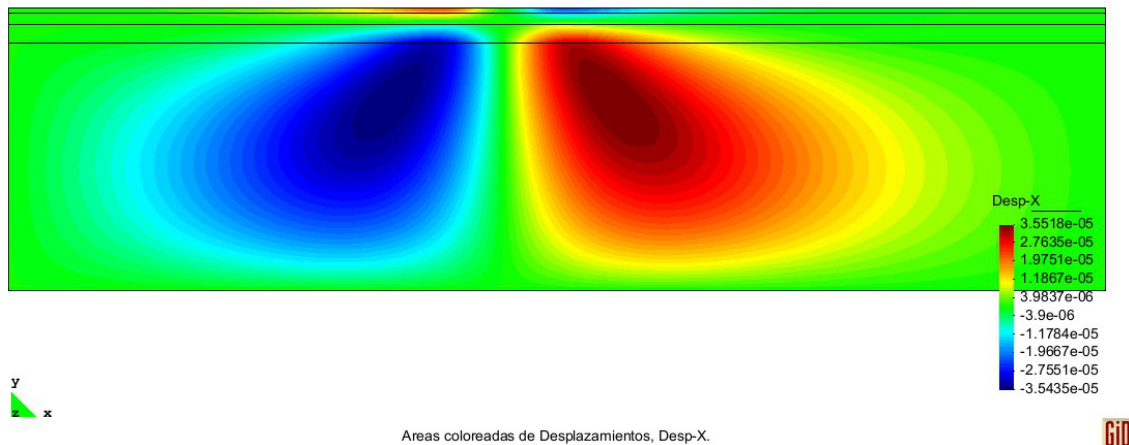


Fig 5.6. Deformación con sus desplazamientos asociados

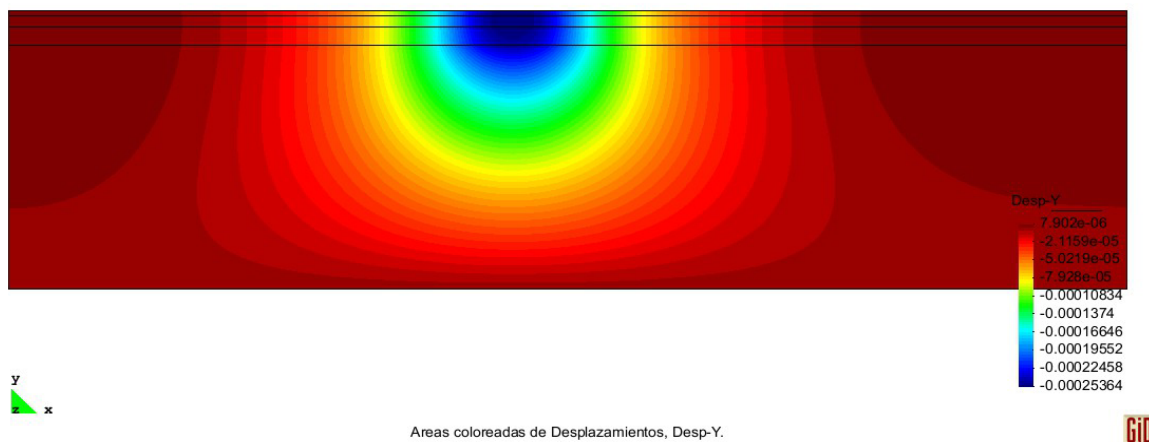
V.2.2 Desplazamientos

El desplazamiento causado por la aplicación de las cargas es diferente en los dos ejes, así como el desplazamiento total.

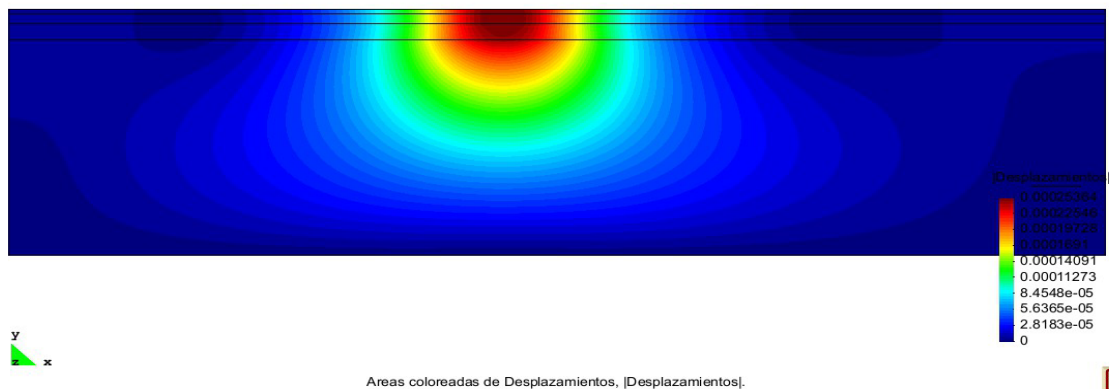
V.2.2.1 . Desplazamiento en eje X



V.2.2.2 Desplazamiento en eje Y



V.2.2.3 Desplazamiento total



V.2.3 Tensiones

En este trabajo nos centraremos con las tensiones principales, que son aquellas en las que no existen tensiones tangenciales o esfuerzos de cizalladura.

Aparecen tensiones de tracción (Fig 5.7) en el medio de las ruedas (ver Fig 5.7), causadas por la corta distancia entre ruedas, las tensiones a tracción son muy perjudiciales para el firme, ya que los materiales tienen más resistencia a compresión que no a tracción, hecho que puede ocasionar una rotura.

Por lo cual, nuestro estudio recaerá en las tensiones principales obtenidas en cada capa para posteriormente poderlas comparar con las tensiones máximas admisibles y la posibilidad de sacar un margen de seguridad.

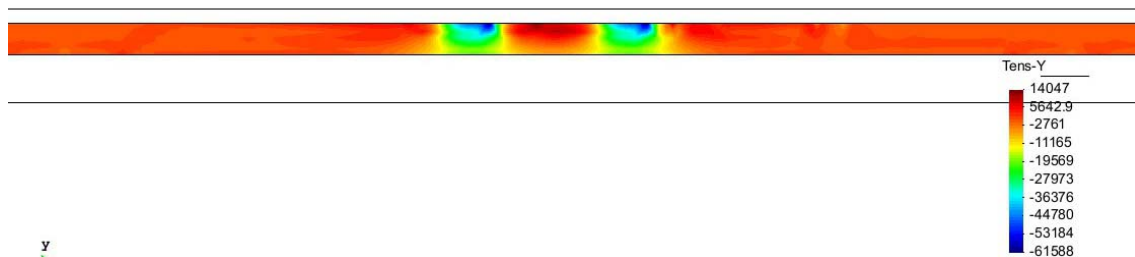


Fig 5.7. Tensiones principales de compresión y tracción en la capa de firme

Estas tensiones de tracción van disminuyendo de magnitud a medida que bajamos de capa, siendo casi nulas en la subbase y nulas en la explanada.

V.2.3.1 Tensiones principales capa rodadura

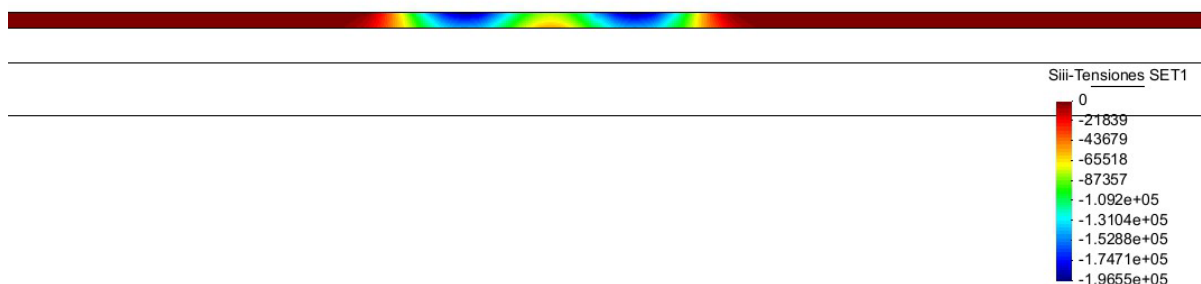


Fig 5.8. Tensiones principales Rodadura

Como vemos todas las tensiones son de compresión, que era lo que esperamos al fijarnos con las tensiones principales. Las tensiones máximas se producen en la superficie de contacto de la rueda con un valor máximo de $\sigma_{iii} = -1,965e5 \text{ N/m}^2$ (a compresión).

V.2.3.2 Tensiones principales capa firme

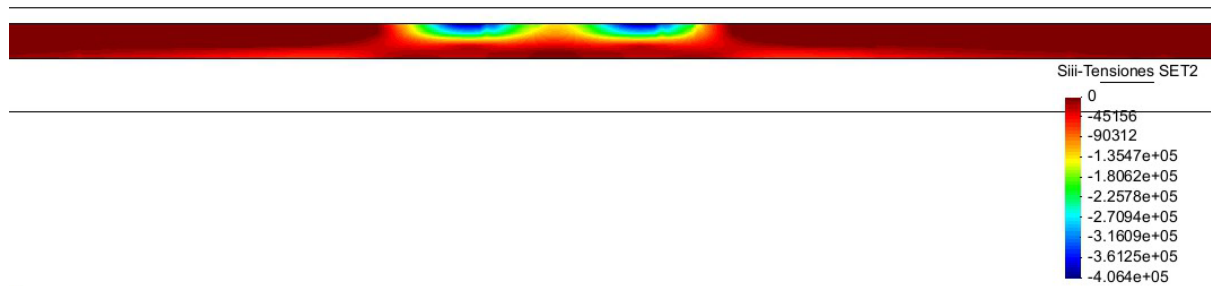


Fig 5.9. Tensiones principales Firme

La tensión máxima tiene un valor de $\sigma_{iii} = -4,064 \text{e}5 \text{ N/m}^2$ (a compresión). En esta capa podemos apreciar que se producen las tensiones máximas de todo el paquete estructural de firme.

V.2.3.3 Tensiones principales capa subbase

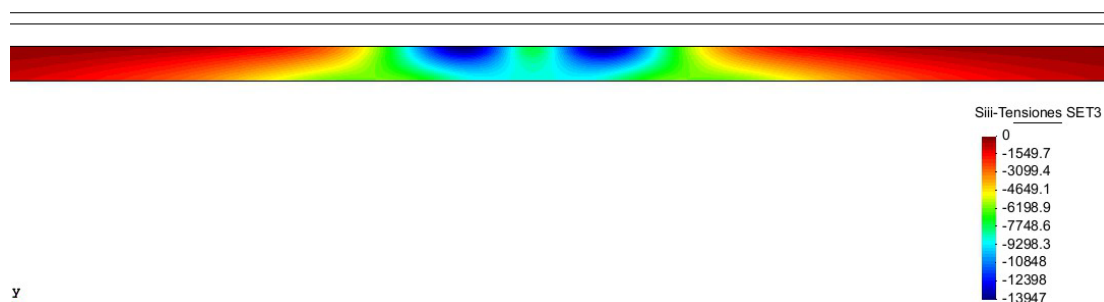


Fig 5.10. Tensiones principales Subbase

Otra vez podemos observar que las tensiones máximas se producen en la superficie de contacto de las ruedas, con una tensión máxima soportada en la capa de la subbase $\sigma_{iii} = -13947 \text{ N/m}^2$ (a compresión).

V.2.3.4 Tensiones principales en la explanada

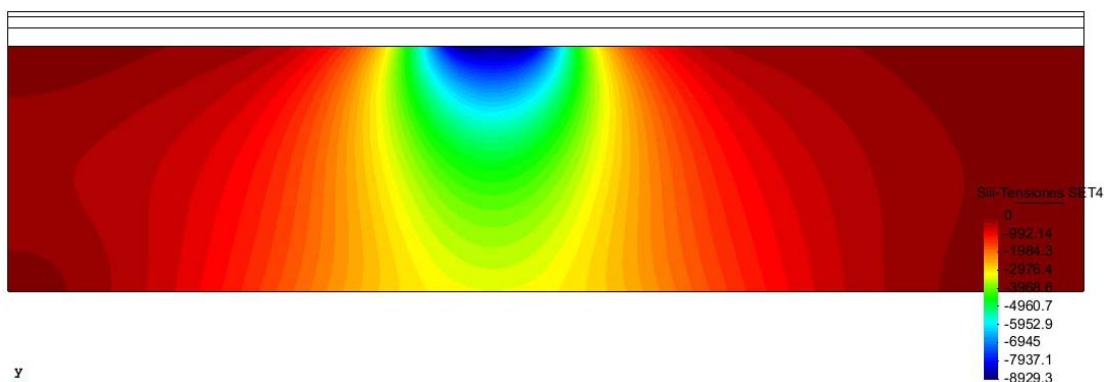


Fig 5.11. Tensiones principales en la Explanada

En este SET4 podemos observar de manera clara el lóbulo de tensiones que forman las cargas.

Tensión máxima de $\sigma_{iii} = -8929,3$ (a compresión).

Vectores de tensiones principales

Compresión

Tracción

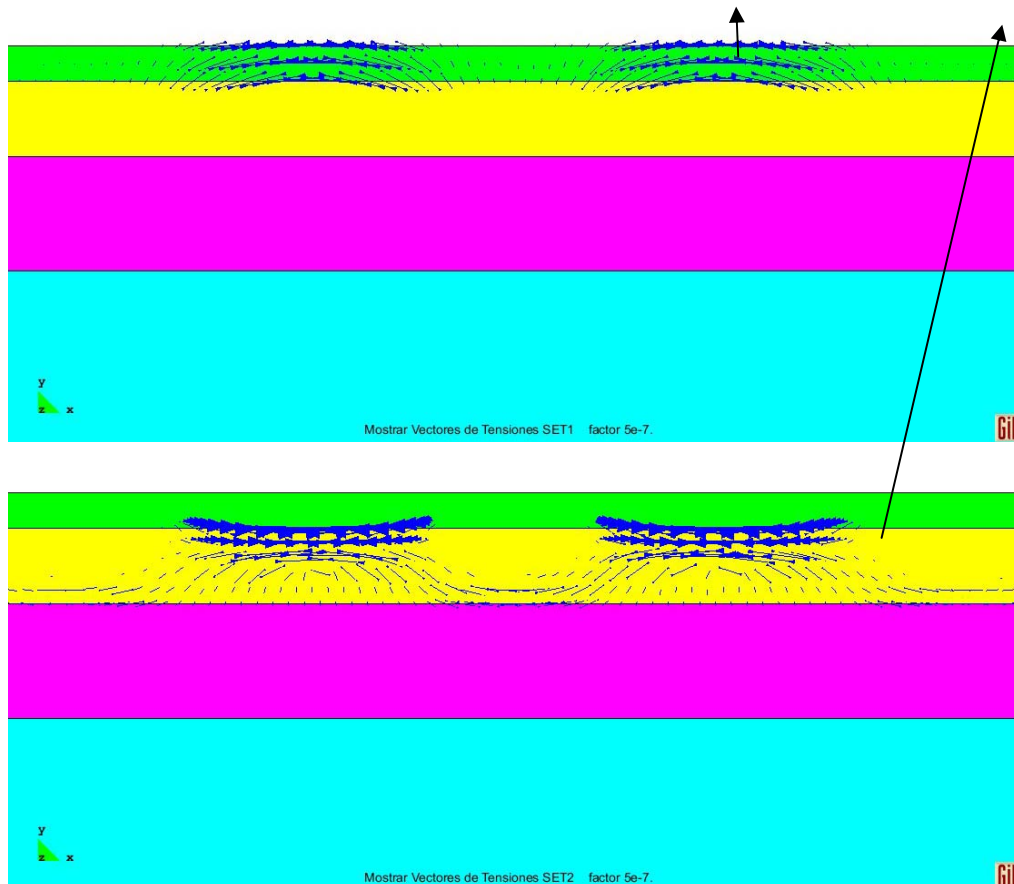


Fig 5.12. Vectores de tensiones

Los vectores de tensiones a tracción son despreciables en la capa subbase y en la explanada.

V.3 Post Proceso Escorias

Cambiando el módulo de elasticidad de las zahorras (463MPa) en la subbase por el módulo de las escorias ($E=1200$ MPa) encontrado en el capítulo VI, analizaremos su Post Proceso.

En el Post Proceso podremos ver las consecuencias de la substitución del material, pudiendo ver la deformación sufrida en la estructura, los desplazamientos causados, así como también las tensiones principales que aparecen en toda la estructura.

V.3.1 Deformación

Como se puede observar en la imagen siguiente las cargas aplicadas causan una deformación en el sentido del eje $-y$. En comparación con el paquete convencional las dos cargas se ven unificadas y la deformación es menor, ya que el paquete es más resistente.

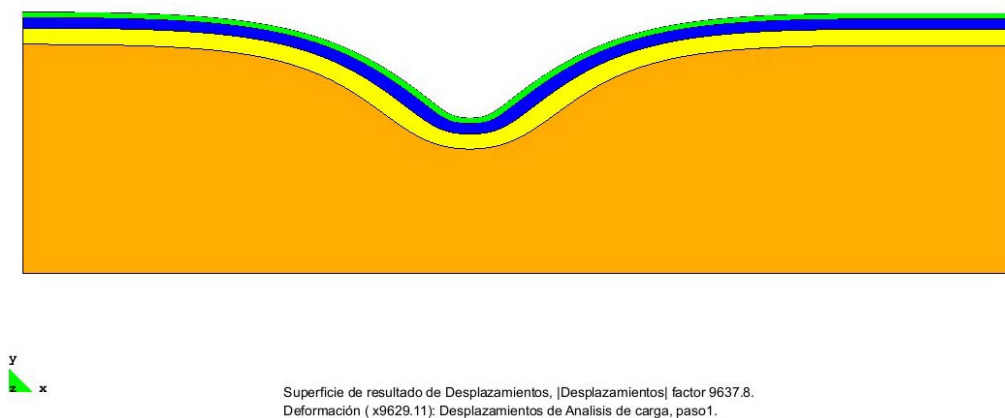


Fig 5.13. Deformación Escorias

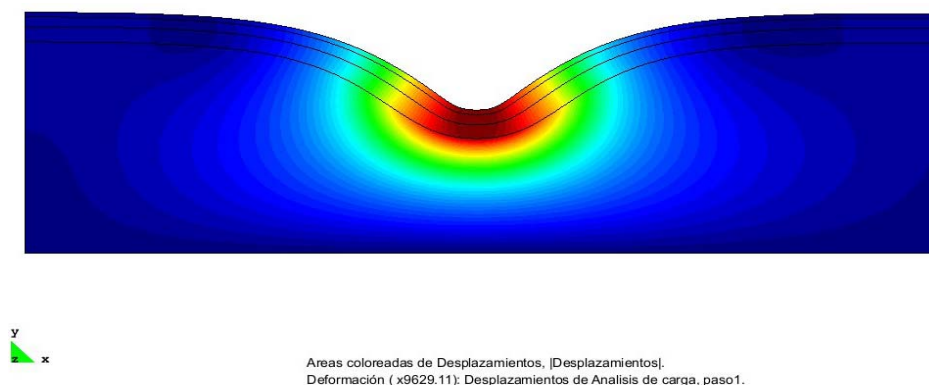


Fig 5.14. Deformación con el desplazamiento total (Escorias)

V.3.2 Desplazamientos

V.3.2.1 Desplazamiento en eje X

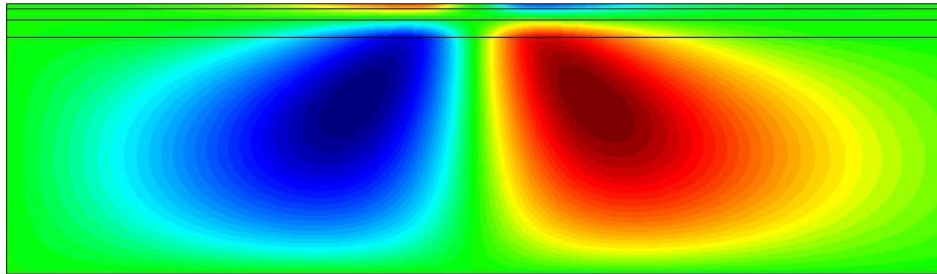


Fig 5.15. Desplazamiento en eje X (Escorias)

En el eje X hay un desplazamiento máximo de $3.4039\text{e-}005$ y un desplazamiento mínimo de $-3.3974\text{e-}005$.

V.3.2.2 Desplazamiento en eje Y

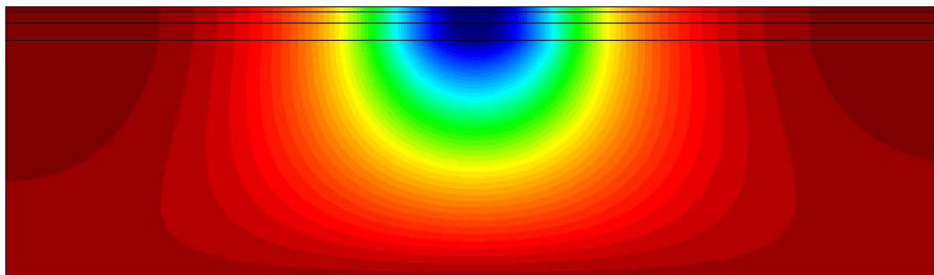


Fig 5.16. Desplazamiento en eje Y (Escorias)

En el eje Y hay un desplazamiento máximo de $8.4466\text{e-}006$ y un desplazamiento mínimo de -0.00023605 .

V.3.2.3 Desplazamiento total

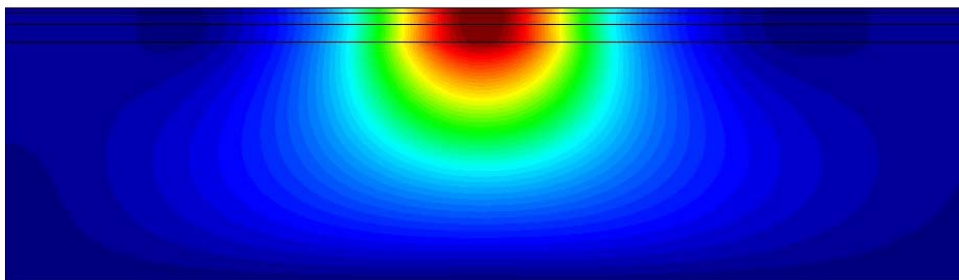


Fig 5.17. Desplazamiento total (Escorias)

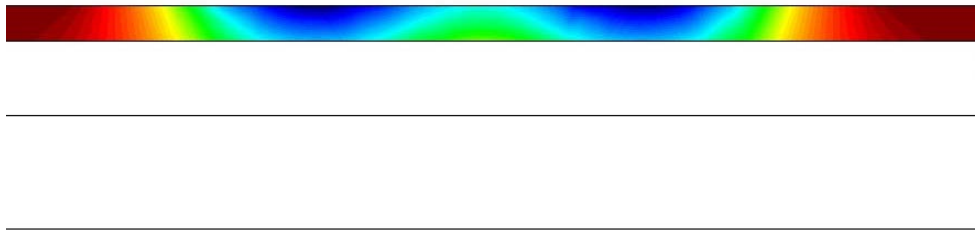
El desplazamiento máximo tiene un valor de 0,00023605, este desplazamiento está situado en la zona de aplicación de la carga, y coincide con la deformación causada. El desplazamiento mínimo es de 0 y lo podemos ver en las proximidades de las restricciones de movimiento, es decir en las caras del rectángulo.

Comparando el resultado con el desplazamiento del paquete convencional (0.00025364), vemos que es un poco más pequeño, por tanto mejor.

V.3.3 Tensiones

En el caso del paquete substituyendo la subbase por escorias también nos fijaremos en las tensiones principales (no existen tensiones tangenciales o esfuerzos de cizalladura).

V.3.3.1 Tensiones principales capa de Rodadura:

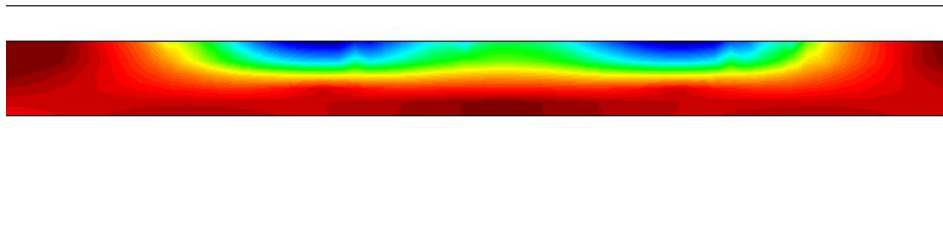


Areas coloreadas de Tensiones SET1 , Siii-Tensiones SET1 .

Fig 5.18. Tensiones principales en Rodadura (Escorias)

Como vemos todas las tensiones son de compresión. Las tensiones máximas se producen en la superficie de contacto de la rueda con un valor máximo de $\sigma_{iii} = -1,111e5 \text{ N/m}^2$ (a compresión).

V.3.3.2 Tensiones principales capa de Firme:



Areas coloreadas de Tensiones SET2 , Siii-Tensiones SET2 .

Fig 5.19. Tensiones principales en el Firme (Escorias)

La tensión máxima tiene un valor de $\sigma_{iii} = -2,841 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (a compresión). En esta capa podemos apreciar que se producen las tensiones máximas de todo el paquete estructural del suelo, pero no tan elevadas como en caso del paquete convencional, ganando así en margen de seguridad.

V.3.3.3 Tensiones principales capa de Subbase:

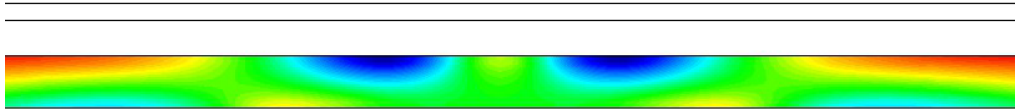


Fig 5.20. Tensiones principales en la Subbase (Escorias)

Otra vez podemos observar que las tensiones máximas se producen en la superficie de contacto de las ruedas, con una tensión máxima soportada en la capa de la subbase $\sigma_{iii} = -15371 \text{ N/m}^2$ (a compresión), esta tensión es menor que la del paquete convencional ya que el módulo del material en la subbase es más grande.

V.3.3.4 Tensiones principales en la Explanada:

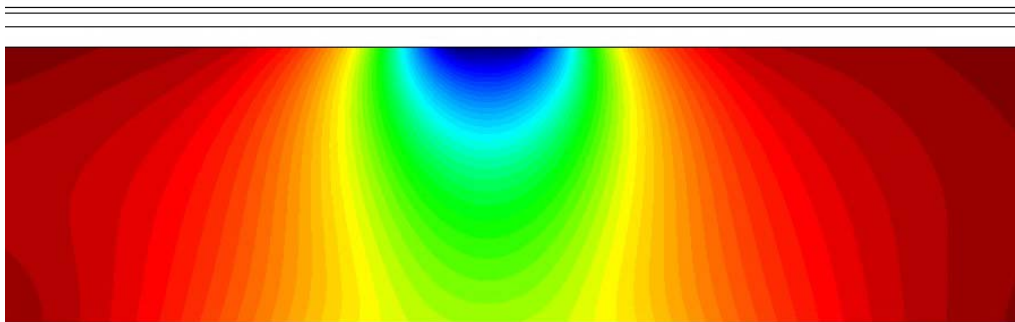


Fig 5.21. Tensiones principales en la Explanada (Escorias)

En el SET4 podemos observar de manera clara el lóbulo de tensiones que forman las cargas.

Comparando las tensiones en esta capa con las del paquete convencional vemos que han disminuido considerablemente gracias al aumento del módulo elástico en la capa de arriba. Pasando la tensión máxima del paquete convencional de $\sigma_{iii} = -8929,3 \text{ N/m}^2$ a $\sigma_{iii} = -7840,4 \text{ N/m}^2$ en el paquete con escorias.

En general en todas las capas las tensiones principales máximas han disminuido notablemente haciendo que el paquete estructural sea más resistente y más apto para soportar cargas mayores.

V.3.4 Análisis de los resultados

En la siguiente Tabla 5.1 se encuentran recogidas todas las tensiones reales para nuestro avión tipo, en cada capa del paquete estructural comparadas con las tensiones admisibles vistas en el capítulo 4.

Tabla 5.1. Tensiones reales y tensiones admisibles para cada material

	Zahorras (Pa)	Escoria (Pa)
σ_{iii} Rodadura	196.500	111.000
σ_{adm} Rodadura	1.500.000	1.500.000
σ_{iii} Firme	406.400	284.000
σ_{adm} Firme	1.300.000	1.300.000
σ_{iii} Subbase	13947	15371
σ_{adm} Subbase	80.800	80.800
σ_{iii} Explanada	8929,3	7840,4
σ_{adm} Explanada	50 000	50 000

En la tabla 5.2 siguiente pueden verse los coeficientes de seguridad obtenidos para cada una de las capas.

Establecer un coeficiente de seguridad es de vital importancia, ya que sirve para conocer el margen de seguridad con el cual trabajamos.

Tabla 5.2 Coeficientes de seguridad obtenidos

	COEF. Convencional	COEF. Escoria
Rodadura	7	11
Firme	3	4
Subbase	5	5
Explanada	5	6

El valor límite admisible del coeficiente de seguridad es siempre subjetivo. En estructuras en habitual tomar como coeficiente de mayoración de cargas $\gamma_f=1,6$

y de minoración de resistencia $\gamma_c=1,5$, con lo cual estamos trabajando con un coeficiente de seguridad global $\gamma_t=1,6 \cdot 1,5=2,4$.

Dado que el coeficiente de seguridad mínimo de todas las capas es mayor que 3, podemos afirmar que estamos convenientemente del lado de seguridad. En el caso que el coeficiente de seguridad global hubiese sido menor que 2,4, se aumentarían los espesores convenientemente hasta lograr los valores deseados.

Como vemos en la Tabla 5.2, los coeficientes de seguridad obtenidos para las escorias son, en cualquier caso, iguales o superiores a los correspondientes para las zahorras, lo que nos da una idea de la posibilidad de su empleo.

VI CAPÍTULO. Presupuesto

Descomposición del precio unitario:

1m³ de zahorra artificial, extendida en tongadas de espesor máximo 30cm y compactada hasta un valor mínimo correspondiente al 100% del Proctor Modificado.

1m ³ de ZAHORRAS ARTIFICIALES			
Unidades	Descripción	Precio unitario	Total
2,33	T. de zahorra artificial en cantera	4,75	11,06
0,05	h. Pala cargadora de neumaticos de 1,5 T/cuchara	35	1,75
0,2	h. Camión 3 ejes 10 toneladas de carga	28	5,6
0,07	T. agua para compactación	2,35	0,16
0,08	h. rodillo compactador	34	2,72
			21,30
	Costes indirectos y varios 6%		1,28
	Precio total		22,58

1m³ de escorias, extendida en tongadas de espesor máximo 30cm y compactada hasta un valor mínimo correspondiente al 100% del Proctor Modificado.

1m ³ de ESCORIA			
Unidades	Descripción	Precio unitario	Total
1,8	T. de escoria comprada en TIRME	2	3,60
0,05	h. Pala cargadora de neumáticos de 1,5 T/cuchara	35	1,75
0,15	h. Camión 3 ejes 10 toneladas de carga	28	4,20
0,11	T. agua para compactación	2,35	0,26
0,08	h. rodillo compactador	34	2,72
			12,53
	Costes indirectos y varios 6%		0,75
	Precio total		13,28

De la medición que se obtiene en el Plano 1.0, obtenemos los siguientes volúmenes de materiales para subbase:

$$2.000.000 \text{ m}^2 \cdot 0,363\text{m} = 726.000 \text{ m}^3$$

- Coste de la subbase con zahorras: $726.000 \text{ m}^3 \cdot 22,58\text{€/m}^3 = 16.393.080\text{€}$
- Coste de la subbase con escorias: $726.000 \text{ m}^3 \cdot 13,28\text{€/m}^3 = 9.641.280 \text{ €}$

Ahorro por sustitución de zahorras por escorias: **6.751.800€.**

VII. CAPÍTULO. Conclusiones

Recordando el objetivo del proyecto: demostrar la posible sustitución de una capa granular del paquete de firme convencional por escorias, de los resultados obtenidos podemos concluir su correcto funcionamiento.

Con el método recomendado por la F.A.A para el cálculo de espesores, hemos dimensionado el paquete de firme, a partir de unas previsiones de tráfico aéreo dadas para el aeropuerto de Palma de Mallorca. Los resultados obtenidos del estudio tensional (realizado con el programa GID conjuntamente con el Calsef), reflejan unos márgenes de seguridad, suficientemente amplios, que están del lado de la seguridad.

Los coeficientes de seguridad obtenidos al sustituir las zahorras por las escorias, son iguales o mayores en todas las capas. En el paquete convencional, el coeficiente de seguridad mínimo es de 3 para la capa de firme donde se producen las tensiones máximas. Al sustituir las zahorras por escorias se ha logrado que todo el paquete estructural sea más rígido, aumentando hasta 4 el coeficiente de seguridad mínimo.

No nos sorprende este hecho puesto que, para firmes flexibles con bases rígidas o firmes rígidos, las tensiones llegan muy disminuidas a la capa de subbase, además de que el módulo elástico para las escorias es mayor que el de las zahorras, tratándose entonces de materiales con bastante capacidad portante.

Por otro lado, al ser más rígido disminuyen las tracciones en las capas superiores en el espacio comprendido entre las dos ruedas, donde estas tensiones son máximas.

No obstante, la resistencia estructural del paquete de firme no es el único factor determinante para el empleo de estos materiales. Deben tenerse en cuenta otros factores como el ambiental, posible contaminación de los lixiviados, etc, que no son objeto de este estudio.

La investigación en estos campos, puede suponer un amplio campo de estudio para la ingeniería moderna. La utilización de estos materiales, reduciendo costes de ejecución de obra y la imperativa necesidad de eliminar las grandes escombreras que ocupan amplias y valiosas parcelas justifican esta línea de desarrollo.

La aplicación de este material, no es exclusivo del campo de obra aeroportuario. Las propiedades que reúnen las escorias (forma aristada, limpieza por estar absentes de materia orgánica, buena adhesividad a los

ligantes bituminosos...), las hacen también adecuadas para su empleo en firmes de carreteras y hasta para la fabricación de ciertos hormigones.

En otros países, por ejemplo Francia, se han empleado con éxito el uso de otro tipo de escoria en capas de grava-escoria, realizándose más de 700Km de refuerzos en carreteras en la década de los 60.

Para concluir, esperamos que en un futuro cercano asistamos al empleo de firmes con bases realizadas con escorias y que la investigación permita el desarrollo de una normativa que justifique su utilización en amplios campos de aplicación.

Bibliografía

- [1] OACI/ICAO, Anexo 14, Manual de Diseño de Aeródromos, 2006.
- [2] COITAE, "Curso de Aeropuertos y Mecánica del suelo. Realización de dicho curso entre el 20 y 25 de abril del 2011.
- [3] OACI/ICAO, "Pavimentos", Parte 3, Manual de Diseño de Aeródromos, 2006
- [4] AENA: *Datos de aeródromo*, en AIP España. [En línea] [Consulta 23 de Mayo del 2011] Disponible en: www.aena.es
- [5] AENA: *ADC-Plano de aeródromo*, en AIP España. [En línea] [Consulta 24 de Mayo del 2011] Disponible en: www.aena.es
- [6] AIRBUS: *Aircraft families/A320 family*. [En línea] [Consulta el 15 de Abril del 2011] Disponible en: <http://www.airbus.com/en/aircraftfamilies/a380>
- [7] DOCSTOC: Estudio de acciones sobre estructura. [En línea] [Consulta 23 Abril] Disponible en: <http://www.docstoc.com/docs/29558773/Instalaciones-Aeroportuarias---C%EF%BF%BDLCULO-DE-PAVIMENTOS-ESTUDIO-DE-ACCIONES-SOBRE-ESTRUCTURA>
- [8] REVISTA ROPDIGITAL: *Empleo de las escorias de alto horno en los firmes de carreteras*. [En línea] [Consulta 9 de Marzo del 2011] Disponible en: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1967/1967_tomol_3031_02.pdf
- [9] PLAN DIRECTOR: *Análisis del entorno*. [En línea] [Consulta 1 de Mayo del 2011] Disponible en: http://www.fomento.es/mfom/lang_castellano/direcciones_generales/aviacion_civil/politicas_aeroportuarias/ita/planes_directores/planes_directores/pd_mallorca.htm
- [10] PLAN DIRECTOR: *Estudio situación actual*. [En línea] [Consulta 2 de Mayo del 2011] Disponible en: http://www.fomento.es/mfom/lang_castellano/direcciones_generales/aviacion_civil/politicas_aeroportuarias/ita/planes_directores/planes_directores/pd_mallorca.htm

- [11] PLAN DIRECTOR: *Evolución previsible demanda*. [En línea] [Consulta 1 de Mayo del 2011] Disponible en: http://www.fomento.es/mfom/lang_castellano/direcciones_generales/aviacion_civil/politicas_aeroportuarias/ita/planes_directores/planes_directores/pd_mallorca.htm
- [12] BOE: Ministerio Obras Públicas. [En línea] [Consulta el 15 de Abril del 2011] Disponible en: <http://www.boe.es/>
- [13] CARRETEROS: Instrucción 6.1 y 2-IC, *Sección de firmas*. [En línea] [Consulta 25 de Mayo del 2011] Disponible en: <http://www.carreteros.org/>
- [14] Ensayo Edómetro: Politécnica de Madrid. [En línea][Consulta el 08 de Julio del 2011] Disponible en: http://delegacion.caminos.upm.es/apuntes/ICCP/4_cuarto/Geotecnia/EL%20EDOMETRO_sin%20soluciones.pdf
- [15] Módulos elásticos y Tensiones admisibles. [En línea] [Consulta 7 Julio del 2011] Disponible en: <http://www.aepo.es/aepo-ld/ausc/publ/firmes.pdf>

ANEXOS

ANEXO 0. Glosario de terminos

A continuacion se indica una breve lista de terminos que se consideran de ambito muncial para describir suelos, materiales de contruccion y componentes de aeropuertos. Estos terminos son los definidos en el Lexico de la OACI, Volumen II (Doc 9119).

Termino internacional	Termino común	Definición
Pavimento	Estructura de pavimento	Combinación de cimientto, firme y revestimiento, colocada sobre un terreno de fundacion para soportar las cargas del transito y distribuirlas al terreno.
CBR	Indice de penetracion California	Relación de resistencia del suelo determinada mediante comparación de la carga de penetración del suelo con un material normalizado. El método abarca la evaluacion de la calidad relativa.
ACN	Numero de clasificacion de aeronaves	Cifra que indica el efecto relativo de una aeronave sobre un pavimento, para determinada resistencia normalizada del terreno de fundacion.
PCN	Numero de clasificacion de pavimentos	Cifra que indica la resistencia de un pavimento, para utilizarlo son restricciones.
LCN		
Terreno de fundación	Formación de fundación	Parte superior del suelo, natural, que soporta las cargas transmitidas por el pavimento.
Resistencia	-	Medida de la idoneidad de un pavimento para soportar la carga aplicada.
Hormigón asfaltico	Hormigón bituminose	Mezcla de árido con asfalto o betún y relleno, extendida en frio o en caliente y finalmente cilindrada.
Coeficiente de seguridad	Factor de seguridad	Dato numérico, mayor que la unidad, asignado con criterios constructivos, que sirve para conocer la tensión máxima de trabajo que debe soportar un material en obra para prevenir los riesgos derivados de su rotura.

ANEXO A. Emplazamiento del aeropuerto de Palma de Mallorca

Mirando el Plan Director para el aeropuerto de Palma de Mallorca, encontramos la configuración del campo de vuelo, y las zonas edificadas.

A.1 Características físicas de las pistas:

Pistas operativas:

- 06L/24R: de 3270 m de longitud. Apta para vuelos instrumentales, estando habilitada para efectuar aproximaciones de precisión de categoría I en ambos sentidos de utilización.
- 06R/ 24L: de 3000 m de longitud. Apta para vuelos instrumentales. Solo se pueden efectuar maniobras de aproximación y aterrizaje en la pista 24L, en concreto aproximaciones de precisión de categoría I. La pista 06R solo es apta para maniobras de despegue.
- 06C/24C: pista de 2500 m de longitud. No apta para vuelos instrumentales.

Designación	Orientación	Longitud	Anchura	Posición umbral	Elevación umbral
06L	059° GEO 061° MAG	3.270 m.	45 m.	39° 32' 49" N 2° 42' 38" E	6.0 m
24R	239° GEO 241° MAG	3.270 m.	45 m.	39° 33' 43" N 2° 44' 33" E	4.0 m
06R	059° GEO 061° MAG	3.000 m.	45 m.	39° 32' 35" N 2° 44' 08" E	9.0 m
24L	239° GEO 241° MAG	3.000m.	45 m.	39° 33' 19" N 2° 45' 41" E	3.8 m
06C	059° GEO 061° MAG	2.500 m.	45 m.	39° 32' 55" N 2° 43' 06" E	5.6 m
24C	239° GEO 241° MAG	2.500 m.	45 m.	39° 33' 37" N 2° 44' 36" E	4.8 m

A.2 Características físicas de las calles de rodaje:

Denominación	Longitud	Anchura	Pavimento	Característica	Avión tipo
NORTH	3.050 m	24 m	Asfáltico	Paralela 06L-24R	Todos
SOUTH	1.015 m	22.5 m	"	Paralela 06R-24L	"
LINK	1.100 m	22.5 m	"	Unión pistas	"

Calles de rodaje	Características
NORTH SOUTH LINK INNER OUTER	Flexible LCN 100 h=62 cm.
	Rígido LCN 71 h=127 cm.

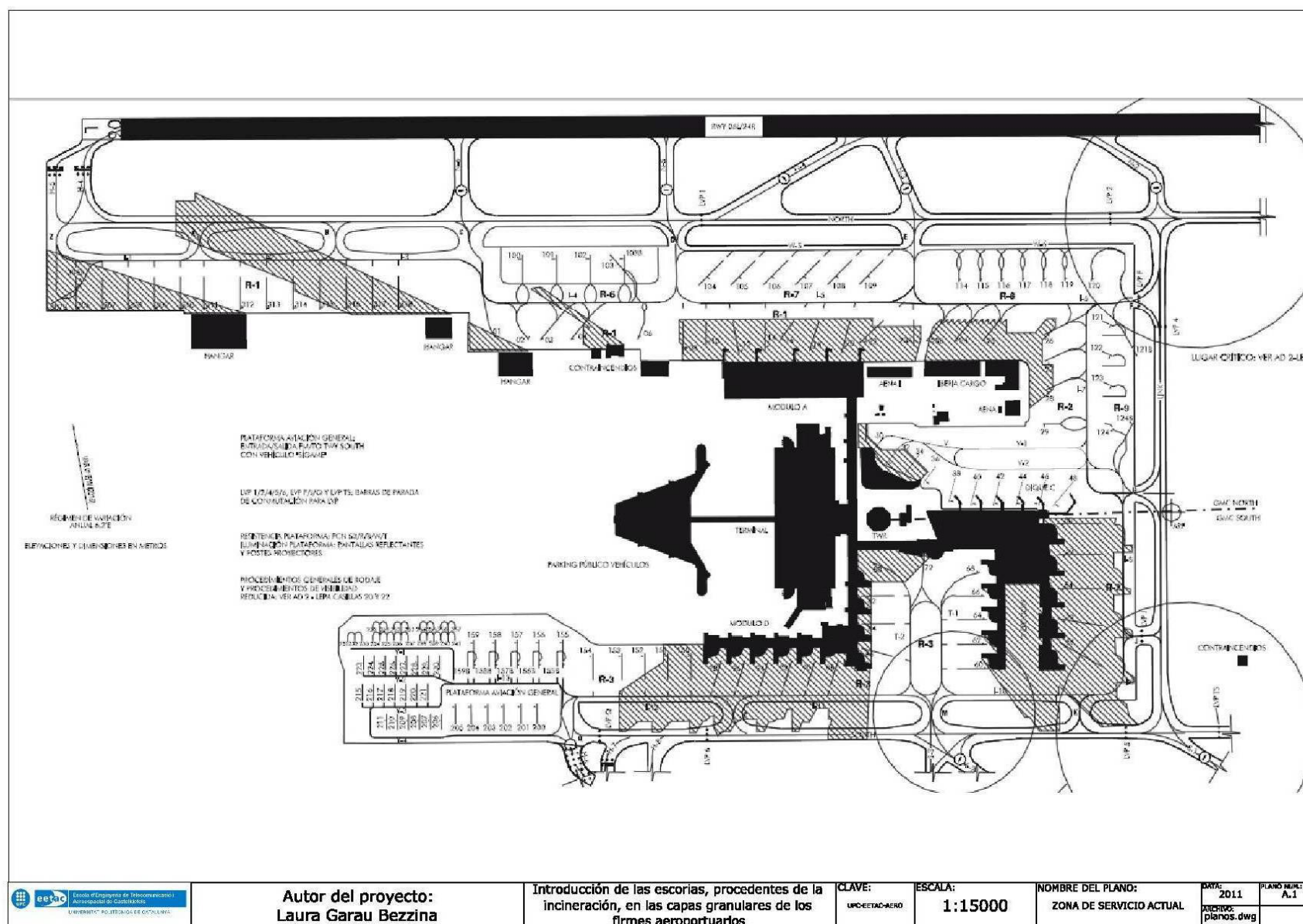
A.3 Características físicas de la plataforma:

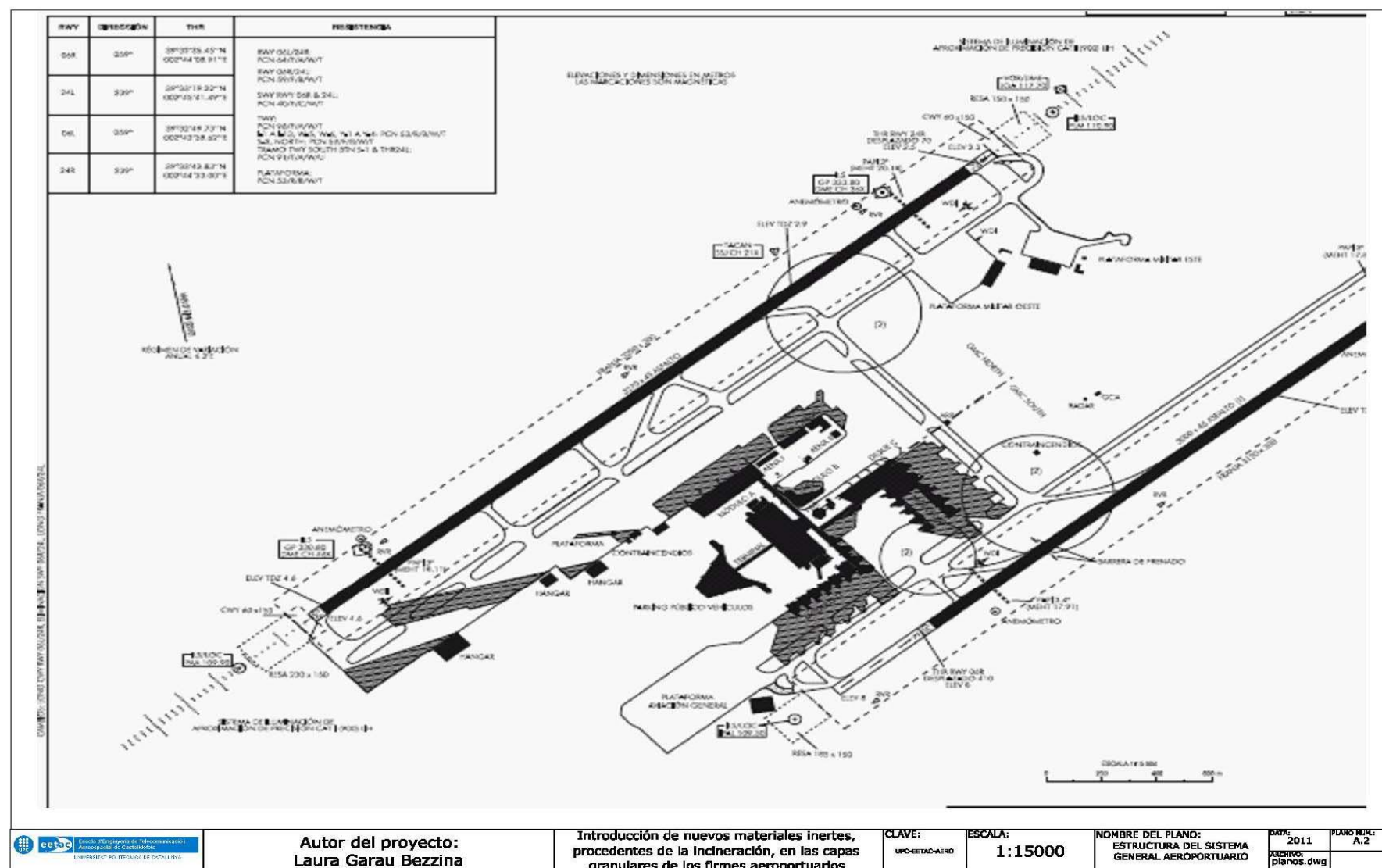
El número total de posiciones es de 75 en plataforma comercial y 57 en plataforma de aviación general. Las posiciones, por tipo de avión, se distribuyen en:

Tipo avión	Número de posiciones
MD-80	24
B-737	11
A-320	11
A-310	1
DC-10	8 + 2
A-300	2
MD-11	5
B-747	5 + 3
B-767	2
A-330	2 + 1

El número de posiciones restante son de aviación general.

En el siguiente plano en ver recogidas todas estas características anteriores del aeropuerto de Palma de Mallorca.



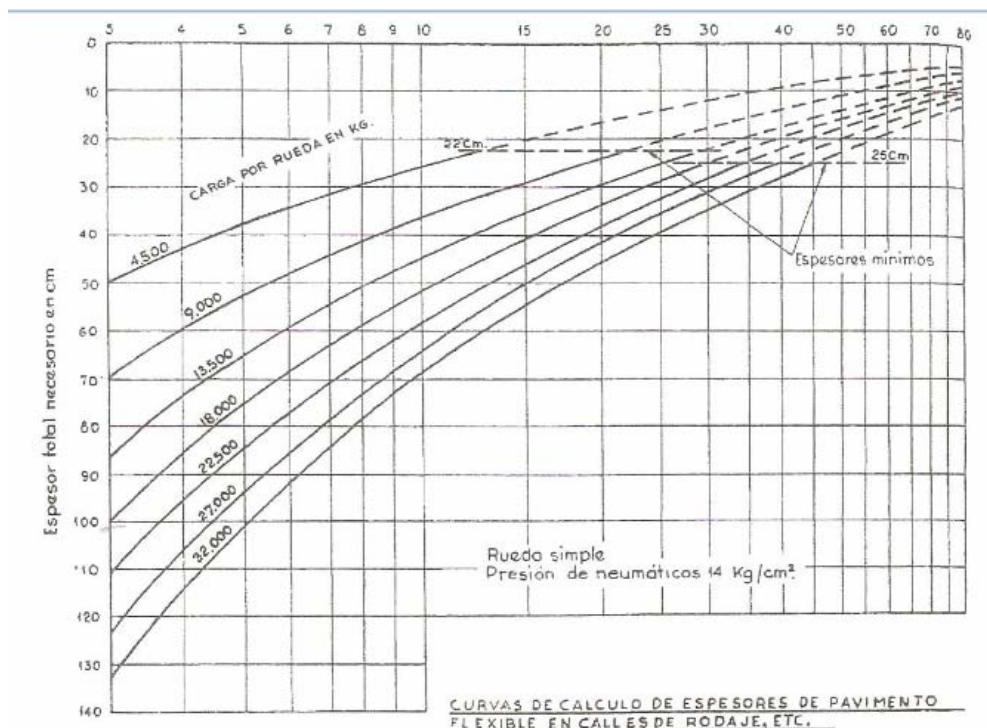


ANEXO B. Método CBR

El método recomendado por la OACI para el cálculo de espesores es el método C.B.R (entre otros) que es el que se ha utilizado en el Capítulo 1.

Se dedujo este método estudiando las tensiones y deformaciones a diferentes profundidades, causadas por la acción de una rueda sencilla y comparando los efectos con los originados por ruedas dobles gemelas y bogies de cuatro ruedas.

Se obtienen los espesores necesarios en función de los valores C.B.R y de las cargas por rueda en caso de trenes de aterrizaje con rueda sencilla y presiones de neumáticos de 7 kg/cm^2 .



Estos gráficos permiten conocer, en primer lugar, la influencia de la calidad del suelo, ya que los espesores necesarios llegan a ser 4,5 veces mayores con valores C.B.R=5 que con valores de C.B.R= 50, por lo tanto se aconseja en los primeros tanteos apreciar si con pavimentos rígidos se obtienen soluciones más económicas.

Por otra parte, se ve que en pavimentos de gran espesor pueden ser distintos y con diferentes valores de CBR los materiales de las distintas capas, aumentando el CBR en las capas superiores. En las capas de rodaje se deben

alcanzar valores de CBR comprendidos entre 125 y 150 cuando las presiones de neumáticos varían entre 12 kg/cm² y 14 kg/cm².

ANEXO C: Dimensionamiento de la aeronave característica

En este apartado se presentan las dimensiones del A320 usando como fuente informativa el ACAP oficial presentando por Airbus.

Dimensiones del avión	Sistema métrico
Longitud total	37,57m
Altura	11,8 m
Diámetro fuselaje	3,97m
Ancho máximo de cabina	3,7m
Envergadura	33,91m
Superficie de sustentación	122,6 m ²
Distancia entre los ejes	18,20m
Configuración tren principal (X)	0,775m

Como vemos, estas distancias son determinantes para caracterizar nuestra aeronave y poder saber cómo están repartidas las cargas por rueda tanto en pista o calles de rodaje (pavimento flexible) como en plataformas (pavimento rígido).

ANEXO D: Resistencia de los pavimentos

Hay una serie de procedimientos normalizados para determinar el ACN de una aeronave, todos ellos se encuentran en el “Manual de diseño de aeródromos, Parte 3”, “Anexo 14 de OACI” o se suministran directamente por los fabricantes.

En esos procedimientos se evalúan varios tipos de aviones actualmente en uso, sobre diferentes pavimentos, y su resultado se refleja en unas tablas según sea flexible o rígido.

Aircraft	All-up mass (kg)			ACN for Rigid Pavement Subgrades (MN/m ³)								ACN for Flexible Pavement Subgrades (CBR%)							
	Max.Take-Off	Operating	tire	High		Medium		Low		Ultra-low		High		Medium		Low		Ultra-low	
	Weight	Weight Empty	pressure	MTOW	OWE	MTOW	OWE	MTOW	OWE	MTOW	OWE	MTOW	OWE	MTOW	OWE	MTOW	OWE	MTOW	OWE
A300 B2	137000	85910	1,20	35	18	42	21	50	25	58	29	39	20	43	22	53	24	68	34
A300 B2 Airbus	142000	85910	1,29	35	19	45	22	53	26	61	30	40	21	45	22	55	25	71	34
A300 B4 Airbus	150000	88180	1,39	41	20	49	22	57	26	65	31	43	21	49	22	59	25	76	35
A300 B4 Airbus	157000	88330	1,48	45	20	53	22	62	26	70	31	46	21	52	22	63	25	80	36
A300 B4 Airbus	165000	88505	1,29	46	17	55	20	64	25	73	29	49	20	56	21	68	25	84	36
A300-600 Airbus	165000	87100	1,29	46	17	55	19	64	24	73	28	49	19	56	21	68	24	84	35
A300-600R Airbus	170000	85033	1,35	49	17	58	19	68	23	78	28	52	19	58	20	71	23	89	34
A300-600R Airbus	171700	85033	1,35	50	17	59	19	69	23	79	28	52	19	59	20	72	23	90	34
A310-200 Airbus	132000	76616	1,23	33	15	39	18	46	22	54	24	36	18	40	19	48	20	64	27
A310-200 Airbus	138600	76747	1,30	35	16	42	18	51	21	58	25	39	18	43	19	52	20	68	28
A310-200 Airbus	142000	75961	1,33	37	15	44	17	52	20	60	23	40	17	44	18	54	20	70	27
A310-300 Airbus	150000	77037	1,42	42	13	49	14	58	17	66	20	44	15	49	15	59	16	76	24
A310-300 Airbus	157000	78900	1,49	45	14	54	15	63	18	71	22	47	15	53	15	64	16	81	25
A320-100 Airbus dual	66000	37203	1,28	37	19	40	20	42	21	44	23	33	18	34	18	38	19	44	22
A320-100 Airbus dual	68000	39700	1,34	39	20	41	22	43	23	45	24	35	19	36	19	40	20	46	23
A320-100 Airbus dual	68000	40243	1,12	18	9	21	10	24	12	28	14	18	9	19	10	23	11	32	14
A320-200 Airbus dual	73500	39748	1,45	44	20	46	22	48	23	50	25	38	19	40	19	44	20	50	24
A320-200 Airbus dual	73500	40291	1,21	18	9	22	10	26	11	30	13	19	9	21	10	26	11	35	14
BAC 1-11 Series 400	39690	22498	0,93	25	13	26	13	28	14	29	15	22	11	24	12	27	13	29	15
BAC 1-11 Series 475	44679	23451	0,57	22	10	25	11	27	12	28	13	19	9	24	10	28	12	31	15
BAC 1-11 Series 500	47400	24757	1,08	32	15	34	16	35	16	36	17	29	13	30	13	33	15	35	17
Bae 146 Series 100	37308	23000	0,80	18	10	20	11	22	12	23	13	17	10	18	10	20	11	24	13
Bae 146 Series 100	37308	23000	0,52	16	9	18	10	19	11	21	12	13	8	16	9	19	11	23	13
Bae 146 Series 200	40600	23000	0,88	22	11	23	12	25	13	26	14	19	10	21	10	23	11	27	13
Bae 146 Series 200	40600	23000	0,61	19	10	21	11	23	12	24	12	16	8	20	10	22	11	27	13
B707-120B	117027	57833	1,17	28	12	33	12	39	15	46	17	31	13	34	14	41	15	54	20

D.1 Resistencia de pavimentos:

En el AIP salen publicados el número de PCN de los pavimentos de las pistas, calles de rodaje y plataforma de los aeropuertos, que son los datos detallados a continuación.

Pistas

06L: PCN 64/F/A/W/T
24R: PCN 64/F/A/W/T
06R: PCN 59/F/B/W/T
SWY: PCN 40/F/C/W/T

24L: PCN 59/F/B/W/T
SWY: PCN 40/F/C/W/T

Plataforma

Resistencia: PCN 53/R/B/W/T.

Calles de rodaje

EXC TWY S-2: 25 m: PCN 96/F/A/W/T.

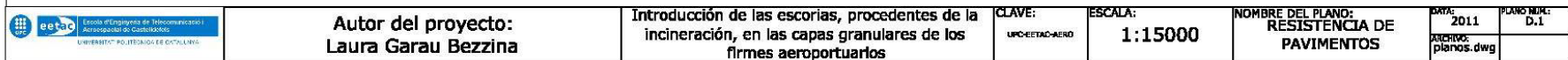
I-1 a I-13, W-5, W-6, Y-1 a Y-4: PCN 53/R/B/W/T.

S-2, NORTH: PCN 59/F/B/W/T.

Tramo de la calle SOUTH entre S-1 y THR 24L: PCN 91/F/A/W/U.

Comprobamos para todas las calles de rodaje, plataforma y pistas que sus $PCN > ACN$ correspondientes ($ACN_R=44$ y $ACN_F=38$).

En el siguiente plano, se muestra el aeropuerto de Palma de Mallorca (LEPA). Con soporte informático Autocad 2008, se diferencia la plataforma militar, que por falta de datos, no podemos asegurar que puede operar un A320.



ANEXO E. Tabla de conversión de los tamices UNE vs ASTM

La normativa de la F.A.A utiliza la designación de los tamices ASTM, al contrario de los ensayos realizados a las escorias y a las zahorras que están en el sistema UNE.

Para verificar su cumplimiento para la su incorporación como capa de firme, hemos utilizado la siguiente tabla de conversión.

Tabla nº 2: Abertura de la serie de tamices UNE y correspondientes de la serie ASTM		
Designación y abertura en mm UNE	Designación del tamiz ASTM	Abertura en mm ASTM
125	5	127
100	4	101,6
80	3	76,2
63	2,5	63,5
50	2	50,8
40	1,5	38,1
32	1,25	31,7
25	1	25,4
20	3/4	19,1
16	5/8	15,9
12,5	1/2	12,7
10	3/8	9,52
8	5/16	7,93
6,3	1/4	6,35
5	Nº 4	4,75
4	Nº 5	4,00
3,2	Nº 6	3,36
2,5	Nº 8	2,38
2	Nº 10	2,00
1,6	Nº 12	1,68
1,25	Nº 16	1,19
1	Nº 18	1,00
0,8	Nº 20	0,84
0,63	Nº 30	0,59
0,5	Nº 35	0,50
0,4	Nº 40	0,42
0,32	Nº 50	0,297
0,25	Nº 60	0,250
0,2	Nº 70	0,210
0,16	Nº 80	0,177
0,125	Nº 120	0,125
0,100	Nº 140	0,105
0,080	Nº 200	0,074

F.1. Ensayo Proctor Modificado del terreno natural



LABORATORIO BALEAR PARA LA CALIDAD, S.L.

Laboratorio acreditado en
EHA Hormigón armado
GTC Sondeos-Geotecnia
GTL Mecánica de suelos
VSF Pavimentos de carreteras

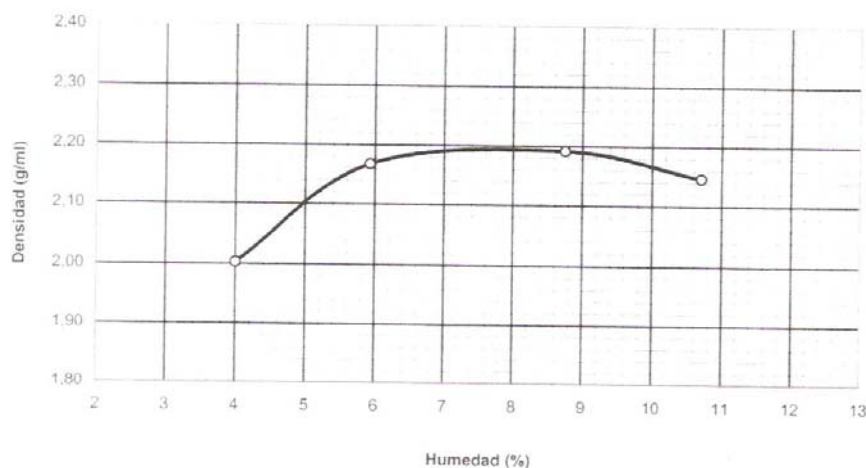
REFERENCIA: 
 PETICIONARIO: TIRME S.A.
 OBRA: VAL. ESCORIAS RSU COMO ZAHORRAS.P.423438
 Procedencia de la muestra: Recogida muestra de terreno.Su ref: P09004-CEDEX- CATA 2
 Fecha toma de muestra: 16 de mayo de 2008
 Uso al que está destinada: Terraplén

Pág. 2 de 2

ENSAYO PROCTOR NORMAL según UNE 103-500-94

Tipo: Normal

Punto	1	2	3	4
Humedad (%)	4,0	5,9	8,7	10,7
Densidad (g/ml)	2,00	2,17	2,19	2,15



Densidad máxima (g/ml)= 2,19 % de muestra mayor d 20 mm= 49
 Humedad óptima (%)= 7,9

Densidad máxima = 2,19 g/ml
 Humedad óptima = 7,9 %

OBSERVACIONES: Debido a la granulometría de la muestra el ensayo se realiza con sustitución

Palma, a 11 de junio de 2008


 Catalina Moll
 Departamento Técnico


 Cristina Maestre
 Dirección Técnica de Ensayos

Serian necesarias más ensayos de muestras del material de fundación, para poder asegurar la homogeneidad de este. La intención es tener un material natural lo más homogéneo posible, al objeto de que las diferencias que pudieran observarse a lo largo del tiempo y efectos del tráfico, fueran independientes y debidas únicamente al paquete estructural del pavimento.

ANEXO G: Construcción y normativa de la SUBASE

G.1 Construcción de la capa de subbase:

Se construyen en general con materiales de aportación exterior a la obra, y rara vez con productos existentes en la explanación, aunque es preferible este último caso por razones económicas si los materiales naturales cumplen las condiciones necesarias.

En la actualidad se emplean mezclas de mejores composiciones granulométricas y de productos que deberán estar exentos de materia vegetal, terrones de arcilla u otras sustancias inestables, constituyendo así una mezcla uniforme de materiales granulares duros, arenas y limos o arcillas. Son materiales tratados.

G.2 Normativa

La normativa de la FAA recomienda las siguientes composiciones para la capa cimentación en lugares donde la penetración del hielo es inferior a 25 centímetros, que es el caso de Palma de Mallorca.

- Los tamaños inferiores al tamiz numero 200, podrán llegar al 35 por 100 de la cantidad que pasa por el tamiz número 10.
- El límite líquido será inferior a 35 y el índice de plasticidad inferior a 9.

Numero de tamiz	%que pasa
4	100
40	10-50
200	0-15

ANEXO H. Ensayo de la subbase

A continuación adjunto el ensayo proporcionado por el Laboratorio Balear, de un terreno SUBBASE.



LABORATORIO BALEAR PARA LA CALIDAD, S.L.

Laboratorio acreditado en:
EHA Hormigón armado
GTC Suelos-Geotecnia
GTL Mecánica de suelos
VSF Pavimentos de carreteras

REFERENCIA:



Pág. 1 de 4

PETICIONARIO:

TIRME S.A.

OBRA:

VAL. ESCORIAS RSU COMO ZAHORRAS.P.423438

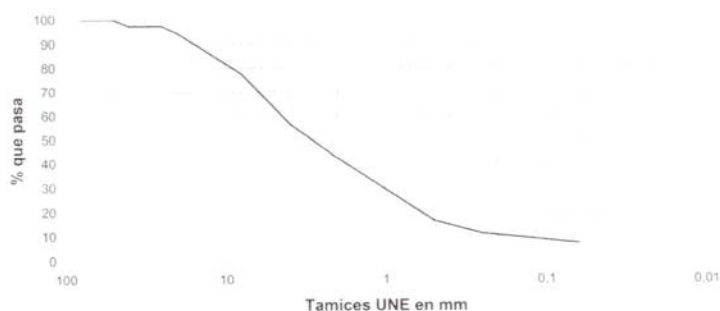
Procedencia de la muestra: Recogida muestra de zahorra en cantera Es Pagos

Fecha toma de muestra: 15 de mayo de 2008

Uso al que está destinada: -

RESULTADO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO



TAMICES UNE	80	50	40	25	20	8	4	2	0,5	0,25	0,063
% QUE PASA	100	100	97	97	95	78	57	42	17	11	7

EQUIVALENTE DE ARENA

Equivalente de arena 49

(UNE-EN 933-8) Código equipo: 5-051

LÍMITES ATTERBERG

Límite Líquido..... -

Límite Plástico..... -

Índice de plasticidad..... N.P.

(UNE 103103-103104) Código equipo: 5-129

OBSERVACIONES

Palma, a 3 de junio de 2008

Catalina Moll
Departamento Técnico

ÍNDICE RESISTENTE CBR

CBR al 90 % de compactación..... 49,6

CBR al 95 % de compactación..... 61,2

CBR al 100% de compactación..... 73,8

Hinchamiento máximo..... -

(para sobrecarga de 9.04 Kg

equivalente a 0.05 Kp/cm2)

Códigos equipos: 5-143, 5-162

PROCTOR MODIFICADO

Máxima densidad(g/ml)... 2,37

Humedad óptima(%)..... 7,2

Código equipo: 5-143

DESGASTE ANGELES

Coefficiente de Desgaste 19

(UNE-EN 1097-2) Código equipo: 5-004

Cristina Maestre
Dirección Técnica de Ensayos

IE160Rev1(Orden FOM/891/2004)

Ciudad de Jesús, 113 07011 Palma de Mallorca 1.971 790 150 1.971 790 712 lbc@laboratoriobalear.com www.laboratoriobalear.com

Los resultados contenidos en este informe están sujetos a ensayo y no pueden ser reproducidos sin la aprobación por escrito del Laboratorio Balear en: Control de Hormigón Armado y sus Componentes, Ensayos de suelo in situ, Geotecnia, Ensayos de Mecánica de Suelos, Control de Firmes Flexibles y Bituminosos y sus Materiales Constituyentes. Registrado con los números 020088-A-05, 020045-TC-03, 020095-GL-05 y 020160-SF-03. Autorizado por el Ministerio de Industria para la realización de ENSAYOS DE DENSIDAD IN SITU, MÉTODOS NUCLEARES, referencia RA 1199. Sistema de Calidad Certificado por AFNOR conforme a la Norma ISO 9001:2000 con Registro de Empresa N° 0144/2007

H.1 Proctor Modificado de las zahorras



LABORATORIO BALEAR PARA LA CALIDAD, S.L.

Laboratorio acreditado en
EHA Hormigón armado
GTC Sondeos-Geotécnia
GTL Mecánica de suelos
VSF Pavimentos de carreteras

REFERENCIA:



Pág. 2 de 4

PETICIONARIO:

TIRME S.A.

OBRA:

VAL. ESCORIAS RSU COMO ZAHORRAS.P.423438

Procedencia de la muestra: Recogida muestra de zahorra en cantera Es Pagos

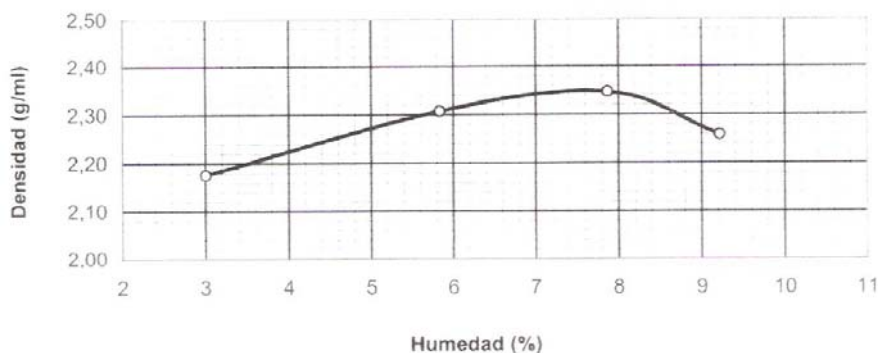
Fecha toma de muestra: 15 de mayo de 2008

Uso al que está destinada: -

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO según UNE 103-501-94

Tipo: Modificado

Punto	1	2	3	4
Humedad (%)	3,0	5,8	7,9	9,2
Densidad (g/ml)	2,18	2,31	2,35	2,26



Densidad máxima (g/ml) =

2,35

% de muestra mayor de

20 mm=

5

Humedad óptima (%) =

7,6

Densidad material > de

20 mm=

2,67 g/ml

Densidad máxima corregida= 2,37 g/ml

Humedad óptima corregida= 7,2 %

Palma, a 3 de junio de 2008


Catalina Moll
Departamento Técnico


Cristina Maestre
Dirección Técnica de Ensayos

IE160Rev1(Orden FOM /891/2004)

Camino de Jesús, 113 07011 Palma de Mallorca. T. 971 790 150 F. 971 790 712 lbc@laboratoriobalear.com www.laboratoriobalear.com

Los resultados contenidos en informes sólo afectan al material sometido a ensayo y no podrán ser reproducidos sin la aprobación por escrito. Laboratorio acreditado por el Govern Balear en: control de Hormigón Armado sus Componentes, Ensayos de suelo in situ, Geotécnia, ensayos de Mecánica de Suelos, Control de Firmes Flexibles y Bituminosos y sus Materiales Constituyentes. Registrado con los números 02008EHA05, 02004G1C03, 02009GTL05 y 02016VSF03. Autorizado por el Ministerio de Industria para la realización de ENSAYOS DE DENSIDAD IN SITU. MÉTODO NUCLEAR. referencia IIA 1/93. Sistema de Calidad Certificado por AENOR conforme la Norma ISO 9001:2000 con Registro de Empresa Nº 0244/2000



LABORATORIO BALEAR PARA LA CALIDAD, S.L.

Laboratorio acreditado en
EHA Hormigón armado
GTC Sondeos Geotécnica
GTL Mecánica de suelos
VSF Pavimentos de carreteras

REFERENCIA:



Pág. 3 de 4

PETICIONARIO:

TIRME S.A.

OBRA:

VAL. ESCORIAS RSU COMO ZAHORRAS.P.423438

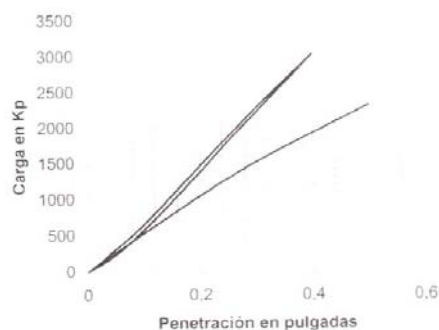
Procedencia de la muestra: Recogida muestra de zahorra en cantera Es Pagos

Fecha toma de muestra: 15 de mayo de 2008

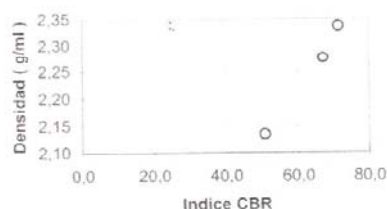
Uso al que está destinada: -

ENSAYO CBR según UNE 103-502-95

Densidad=	2,34
Q1=Carga para 0.1" de penetración=	651
Q2=Carga para 0.2" de penetración=	1456
Caso 1: Q1 x 0.0735 =	47,85
Caso 2: Q2 x 0.0490 =	71,34
CBR=	71,34
Densidad=	2,28
Q1=Carga para 0.1" de penetración=	568
Q2=Carga para 0.2" de penetración=	1367
Caso 1: Q1 x 0.0735 =	41,75
Caso 2: Q2 x 0.0490 =	66,98
CBR=	66,98
Densidad=	2,13
Q1=Carga para 0.1" de penetración=	529
Q2=Carga para 0.2" de penetración=	1036
Caso 1: Q1 x 0.0735 =	38,88
Caso 2: Q2 x 0.0490 =	50,76
CBR=	50,76



CBR	71,3	67,0	50,8
Densidad (g/ml)	2,34	2,28	2,13



Densidad Próctor menores de 20 mm= 2.35

Densidad 90 % com=	2,12 g/ml
Densidad 95 % com=	2,23 g/ml
Densidad 100 % =	2,35 g/ml

Compactación Próctor	Modificado
CBR al 90 % de compactación=	49,6
CBR al 95 % de compactación=	61,2
CBR al 100% de compactación=	73,8

Palma, a 3 de junio de 2008

Catalina Moll
Departamento Técnico

Cristina Maestre
Dirección Técnica de Ensayos

IE160Rev1(Orden FOM /891/2004)

Camino de Jesús, 113 07011 Palma de Mallorca I 971 790 150 I 971 790 712 lbc@laboratoriobalear.com www.laboratoriobalear.com

Los resultados contenidos en informes sólo afectan al material sometido a ensayo y no podrán ser reproducidos sin la aprobación por escrito. Laboratorio acreditado por el Govern Balear en: control de Hormigón Armado sus Componentes, Ensayos de suelo in situ, Geotécnica, ensayos de Mecánica de Suelos, Control de Firmes Flexibles y bituminosos y sus Materiales Constituyentes. Registrado con los números 02008EHA05, 02004GTC, 02009GTL05 y 02016VSH03. Autorizado por el Ministerio de Industria para la realización de ENSAYOS DE DENSIDAD IN SITU: METODO NUCLEAR, referencia IRA 1793. Sistema de Calidad Certificado por AENOR conforme la Norma ISO 9001:2000 con Registro de Empresa Nº 0244/2000.



LABORATORIO BALEAR PARA LA CALIDAD, S.L.

Laboratorio acreditado en:
 FHA Hormigón armado
 GTC Suelos: Geotecnia
 GFL Mecánica de suelos
 VSF Pavimentos de carreteras

REFERENCIA:



Pág. 4 de 4

PETICIONARIO:

TIRME S.A.

OBRA:

VAL. ESCORIAS RSU COMO ZAHORRAS.P.423438

Procedencia de la muestra: Recogida muestra de zahorra en cantera Es Pagos

Fecha toma de muestra: 15 de mayo de 2008

Uso al que está destinada: -

INDICE DE LAJAS

Índice de lajas:.....

(UNE-EN 933-3)

Código equipo 5-047 5-370

CARAS DE FRACTURA

Part. totalmente trituradas(%)

Partículas redondeadas(%)

(UNE-EN 933-5)

COEFICIENTE DE LIMPIEZA SUPERFICIAL

Porcentaje limpieza(%)

(ANEXO C UNE 146130 00)

HUMEDAD

Humedad(%) 2,3

COMPUESTOS DE AZUFRE EN ÁRIDOS

Contenido total en azufre (% S)....

Sulfatos solubles en ácido(%SO₃).....

(UNE-EN 1744-199)

Palma, a 3 de junio de 2008


 Catalina Moll
 Departamento Técnico


 Cristina Maestre
 Dirección Técnica de Ensayos

IE160Rev1(Orden FOM /891/2004)

Camino de Jesús, 113. 07011 Palma de Mallorca. T. 971 790 150. F. 971 790 712. info@laboratoriobalear.com www.laboratoriobalear.com

Los resultados contenidos en informes sólo afectan al material sometido a ensayo y no podrán ser reproducidos sin la autorización por escrito. Laboratorio acreditado por el Sistema Balear en: Control de Hormigón Armado y sus Componentes, Ensayos de suelo in situ, Geotecnia, ensayos de Mecánica de Suelos, Control de Firmes Flexibles y Bituminosos y sus Materiales Constituyentes. Registrado con los números 02008 HAZO, 02008 AGTCE, 02009 GLO5 y 02016 VSF03. Autorizado por el Ministerio de Industria para la realización de ENSAYOS DE URANIDAD IN SITU, MÉTODOS NUCLEAR, referencia IRA 1793. Sistema de Calidad Certificado por BUREAU VERITAS conforme a la Norma ISO 9001:2000 con Registro de Empresa NF 0244/2000.

ANEXO I. Ensayos de las escorias



LABORATORIO BALEAR PARA LA CALIDAD, S.L.

Laboratorio acreditado en
EHA Hormigón armado
GTC Suelos-Geotecnia
GTL Mecánica de suelos
VSF Pavimentos de carreteras

REFERENCIA:



Pág. 1 de 4

PETICIONARIO:

TIRME S.A.

OBRA:

VAL. ESCORIAS RSU COMO ZAHORRAS.P.423438

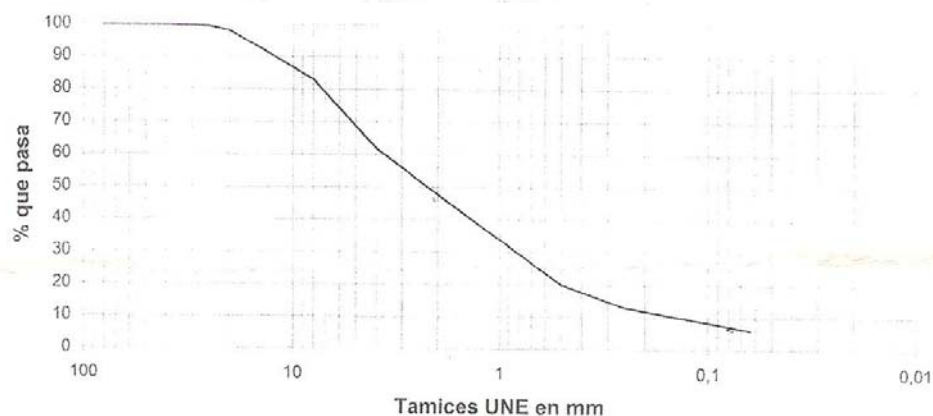
Procedencia de la muestra: Mezcla íntegra del material 0/8 y 8/35 de los albaranes 737605 y 737606

Fecha toma de muestra: 6 de mayo de 2008

Uso al que está destinada: -

RESULTADO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO



TAMICES UNE	80	50	40	25	20	8	4	2	0,5	0,25	0,063
% QUE PASA	100	100	100	99	98	83	62	48	20	13	6

EQUIVALENTE DE ARENA

Equivalente de arena 54
(UNE-EN 933-8) Código equipo: 5-051

LÍMITES ATTERBERG

Límite Líquido..... -

Límite Plástico..... -

Índice de plasticidad..... N.P.

(UNE 103103-103104) Código equipo: 5-129

OBSERVACIONES:

Palma, a de 2008

Catalina Moll
Departamento Técnico

ÍNDICE RESISTENTE CBR

CBR al 90 % de compactación..... 47,9

CBR al 95 % de compactación..... 67,9

CBR al 100 % de compactación..... 93,1

Hinchamiento máximo..... 0,21%

(para sobrecarga de 9.04 Kg

equivalente a 0.05 Kp/cm²)

Códigos equipos: 5-143, 5-162

PROCTOR MODIFICADO

Máxima densidad(g/ml).. 1,81

Humedad óptima(%)..... 14,3

Código equipo: 5-143

DESGASTE ANGELES

Coefficiente de Desgaste 35

(UNE-EN 1097-2) Código equipo: 5-004

Cristina Maestre
Dirección Técnica de Ensayos

IE160Rev1(Orden FOM/891/2004)

Camino de Jesús, 113 07011 Palma de Mallorca t. 971 790 150 f. 971 790 712 lbx@laboratoriobalear.com www.laboratoriobalear.com

Los resultados y conclusiones en ningún caso afectan al material sometido a ensayo y no podrán ser reproducidos sin la aprobación por escrito. Laboratorio acreditado por el Govern Balear en control de Hormigón Armado y sus Componentes, Ensayos de suelo in situ, Geotecnia, ensayos de Mecánica de Suelos, Control de Firmes Flexibles y Bituminosos y sus Materiales Constituyentes. Registrado con los números 02004E-HACS 02004G-IT03, 02009G-TLOS y 02016V-SF03. Autorizado por el Ministerio de Industria para la realización de ENSAYOS DE DENSIDAD IN SITU, MÉTODO NUCLEAR, referencia IRA 1793, Sistema de Calidad Certificado por AENOR conforme a la Norma ISO 9001:2000 con Registro de Empresa Nº.0246/2000

I.1. Proctor Modificado de las escorias



LABORATORIO BALEAR PARA LA CALIDAD, S.L.

Laboratorio acreditado por:
 ENA Hormigón armado
 GTC Saneamiento-Geotecnia
 GTC Mecánica de suelos
 VSF Pavimentos de carretera

REFERENCIA:



Pág. 2 de 4

PETICIONARIO:

TIRME S.A.

OBRA:

VAL.ESCORIAS RSU COMO ZAHORRAS.P.423438

Procedencia de la muestra: Mezcla íntegra del material 0/8 y 8/35 de los albaranes 737605 y 737606

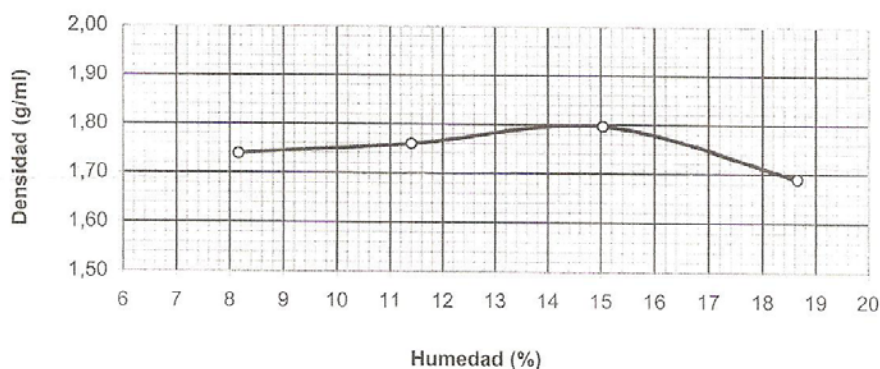
Fecha toma de muestra: 6 de mayo de 2008

Uso al que está destinada: -

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO según UNE 103-501-94

Tipo: Modificado

Punto	1	2	3	4
Humedad (%)	8,2	11,4	15,0	18,7
Densidad (g/ml)	1,74	1,76	1,80	1,69



Densidad máxima (g/ml) = 1,80 % de muestra mayor de 20 mm = 2
 Humedad óptima (%) = 14,6 Densidad material > de 20 mm = 2,27 g/ml

Densidad máxima corregida = 1,81 g/ml

Humedad óptima corregida = 14,3 %

Palma, a de 2008

Catalina Moll
 Departamento Técnico

Cristina Maestre
 Dirección Técnica de Ensayos

IE160Rev1(Orden FOM/891/2004)

Calle de Jesús, 143 - 07011 Palma de Mallorca - T. 971 790 150 - F. 971 790 712 - lbc@laboratoriobalear.com - www.laboratoriobalear.com

Los resultados contenidos en informes sólo afectan al material sometido a ensayo y no podrán ser reproducidos sin la aprobación por escrito. Laboratorio acreditado por el Gobierno Balear en: Control de Hormigón Armado y sus Componentes, Ensayos de suelo in situ, Geotecnia, ensayos de Mecánica de Suelos, Control de Firmes Flexibles y Bituminosos y sus Materiales Constituyentes. Registrado con los números: 02008EHA05, 02004GTC03, 02009GTC05 y 02016VST03. Autorizado por el Ministerio de Industria para la realización de ENSAYOS DE DENSIDAD IN SITU, MÉTODO NUCLEAR, referencia IBA 1/93. Sistema de Calidad Certificado por AENOR conforme a la Norma ISO 9001:2000 con Registro de Empresa N.º 0244/2000



LABORATORIO BALEAR PARA LA CALIDAD, S.L.

Laboratorio acreditado en
 EHA Hormigón armado
 GTC Sondas-Geotecnia
 GTL Mecánica de suelos
 VSF Pavimentos de Carreteras

REFERENCIA:



Pág. 3 de 4

PETICIONARIO:

TIRME S.A.

OBRA:

VAL. ESCORIAS RSU COMO ZAHORRAS.P.423438

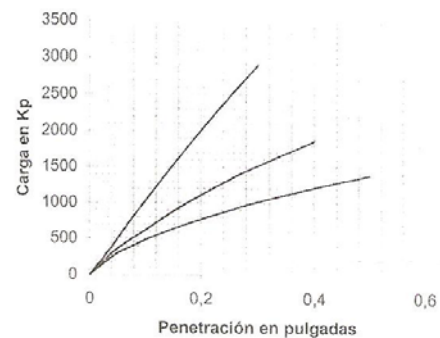
Procedencia de la muestra: Mezcla íntegra del material 0/8 y 8/35 de los albaranes 737605 y 737606

Fecha toma de muestra: 6 de mayo de 2008

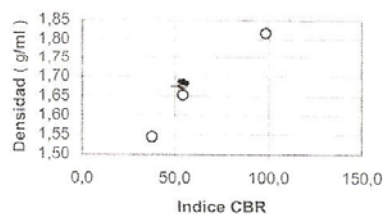
Uso al que está destinada: -

ENSAYO CBR según UNE 103-502-95

Densidad=	1,82
Q1=Carga para 0.1" de penetración=	1017
Q2=Carga para 0.2" de penetración=	2007
Caso 1: Q1 x 0.0735 =	74,75
Caso 2: Q2 x 0.0490 =	98,34
CBR=	98,34
Densidad=	1,65
Q1=Carga para 0.1" de penetración=	610
Q2=Carga para 0.2" de penetración=	1109
Caso 1: Q1 x 0.0735 =	44,84
Caso 2: Q2 x 0.0490 =	54,34
CBR=	54,34
Densidad=	1,54
Q1=Carga para 0.1" de penetración=	477
Q2=Carga para 0.2" de penetración=	771
Caso 1: Q1 x 0.0735 =	35,06
Caso 2: Q2 x 0.0490 =	37,78
CBR=	37,78



CBR	98,3	54,3	37,8
Densidad (g/ml)	1,82	1,65	1,54



Densidad Próctor menores de 20 mm= 1,8

Densidad 90 % com=	1,62	g/ml
Densidad 95 % com=	1,71	g/ml
Densidad 100 % =	1,80	g/ml

Compactación Próctor	Modificado
CBR al 90 % de compactación=	47,9
CBR al 95 % de compactación=	67,9
CBR al 100 % de compactación=	93,1

Palma, a de 2008

Catalina Moll
 Departamento Técnico

Cristina Maestre
 Dirección Técnica de Ensayos

IE160Rev1(Orden FOM /891/2004)

Camino de Jesús, 113 07011 Palma de Mallorca T. 971 790 150 F. 971 790 712 fbc@laboratoriobalear.com www.laboratoriobalear.com

Los resultados contenidos en informes solo aplican al material sometido a ensayo y no podrán ser reproducidos sin la aprobación por escrito. Laboratorio acreditado por el Govern Balear en: control de Hormigón Armado y sus Componentes, Ensayos de suelo in situ, Geotecnia, ensayos de Mecánica de Suelos, Control de Finas, Flexibles y Bituminosos y sus Agregados Constituyentes. Registrado con los números 0200561-015 (2004) y 0200561-016 y 02016VSP05. Autorizado por el Ministerio de Industria para la realización de ENSAYOS DE DENSIDAD IN SITU, MÉTODO NUCLEAR, referencia IBA 17M3. Sistema de Calidad Certificado por AENOR conforme a la Norma ISO 9001:2000 con Registro de Licitación Nº 0244/2000.



LABORATORIO BALEAR PARA LA CALIDAD, S.L.

Laboratorio acreditado en:
 EHA Homogéneo armado
 GTC Suelos Geotécnica
 GIL Mecánica de suelos
 VSH Pavimentos de carreteras

REFERENCIA:



Pág. 4 de 4

PETICIONARIO:

TIRME S.A.

OBRA:

VAL. ESCORIAS RSU COMO ZAHORRAS.P.423438

Procedencia de la muestra: Mezcla integral del material 0/8 y 8/35 de los albaranes 737605 y 737606

Fecha toma de muestra: 6 de mayo de 2008

Uso al que está destinada: -

MATERIA ORGANICA (UNE 103204)

Materia orgánica (%)..... 1,81

CONTENIDO EN YESOS (NLT 115)

Contenido yesos (%)..... 3,76

SALES SOLUBLES (NLT 114)

Contenido sales (%)..... 1,15

COMPUESTOS DE AZUFRE EN ÁRIDOS

Contenido total en azufre (% S).... 1,41

Sulfatos solubles en ácido(%SO₃)..... 2,09

(UNE-EN 1744-1-99)

Palma, a 3 de junio de 2008

Catalina Moll
 Departamento Técnico

Cristina Maestre
 Dirección Técnica de Ensayos

IE160Rev1(Orden FOM /891/2004)

Carrino de Júcar, 113 07011 Palma de Mallorca T. 971 750 150 F. 971 750 712 lbc@laboratoriobalear.com www.laboratoriobalear.com

Las fotografías contenidas en este informe afectan al material sometido a ensayo y no podrán ser reproducidas sin la aprobación por escrito. Laboratorio acreditado por el General Balear en control de Homogéneo Armado, Control de Suelos Geotécnica, ensayos de Mecánica de Suelos, Control de Firmes Flexibles y Blandos y sus Materiales Constituyentes. Registrado con los números 02006HAB, 02004AG, 02009GIL y 02014VSG. Autorizado por el Ministerio de Industria para la realización de ENSAYOS DE DENSIDAD IN SITU, MÉTODO NUCLEAR, referencia IRA 1/93. Sistema de Calidad Certificado por AENOR según la Norma ISO 9001/2000 con Registro de Empresa Nº.0244/2000

I.2 Comentarios sobre el ensayo realizado a las escorias

Se han mezclado escorias del tamaño 0/8 y 8/20 (albaranes 737605 y 737606), sometiéndolas a diversos ensayos al objeto de poder clasificar el suelo, según el artículo 330 del PG-3.

Dado que únicamente tenemos un ensayo, lo que procede en este caso es disponer de un muestreo más amplio, para poder examinar los resultados con mayor precisión y conocimiento, evaluando el grado de dispersión de los valores obtenidos.

En cuanto a la humedad óptima, la densidad máxima se corresponde con una humedad del 15%, en general elevada, para los suelos que habitualmente estamos manejando. Notar también que la curva densidad-humedad, es extremadamente plana, especialmente antes de la humedad óptima, lo que significa que la compactación y por tanto la densidad, serán poco sensibles a las variaciones de humedad. Una vez sobrepasada la densidad óptima, la curva cae con mayor pendiente, lo que indica que sería perjudicial compactar con humedades superiores a la óptima...

EL índice CBR, según el ensayo UNE 103-502-95 es 37,78, lo que es significa un buen resultado.

En cuanto a la granulometría sobran los comentarios ya que la muestra se ha obtenido mezclando material 0/8 y 8/35, siendo la curva granulométrica reflejo de este hecho.

EL valor del equivalente de arena de 54 es un buen resultado, cumpliendo las especificaciones exigibles incluso a las zahorras.

En cuanto a la plasticidad, el material cumple las exigencias más restrictivas ya que se ha clasificado como “no plástico”.

J. Comprobación de las secciones con el modelo numérico (3D)

J.1 Pre Proceso:

La modelización del stand se realiza con el programa GID y la asignación de propiedades (calculadas en los capítulos 2 y 3) con el Calsef 2001.

J.1.1 Diseño estructural, superficies y volúmenes:

Un vértice del rectángulo se define en el centro de coordenadas (0, 0, 0) y una de sus caras está contenida en el plano XZ. Las dimensiones del rectángulo como la área de contacto de las ruedas se encuentra definida en el capítulo XX. El área de contacto es donde aplicaremos las cargas en el eje $-z$.

Por tanto tenemos 4 volúmenes, correspondientes a las 4 capas del paquete. En la Fig 5.1 se pueden ver las diferentes partes representadas con diferentes colores. Las líneas azules corresponden a las aristas, las lilas a las superficies y las azul claro al volumen.

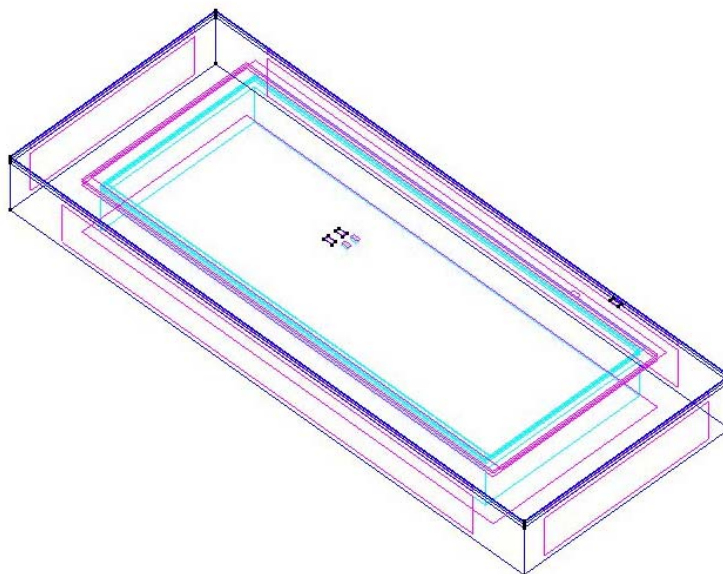


Fig J.1. Estructura

J.1.2 Condiciones de contorno y propiedades mecánicas:

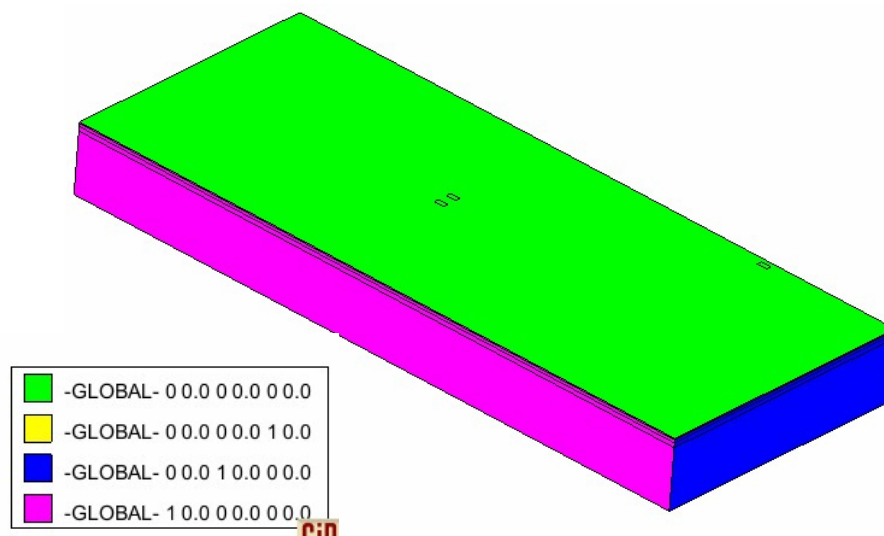
Para realizar el cálculo hay que seguir diversos pasos y definir las condiciones de contorno como la restricción de movimientos, definir las cargas, peso específico, y definir las propiedades del material de la estructura.

J.2.1 Asignación de desplazamientos fijos

Hay tres tipos de restricciones, puntuales, lineales o de superficie. En nuestro caso asignaremos una restricción de desplazamiento en superficies.

Restringimos los desplazamientos fijos en Y sobre las superficies paralelas al plano YZ. Y así sucesivamente en los otros ejes, quedando libre el desplazamiento en z de la cara XY.

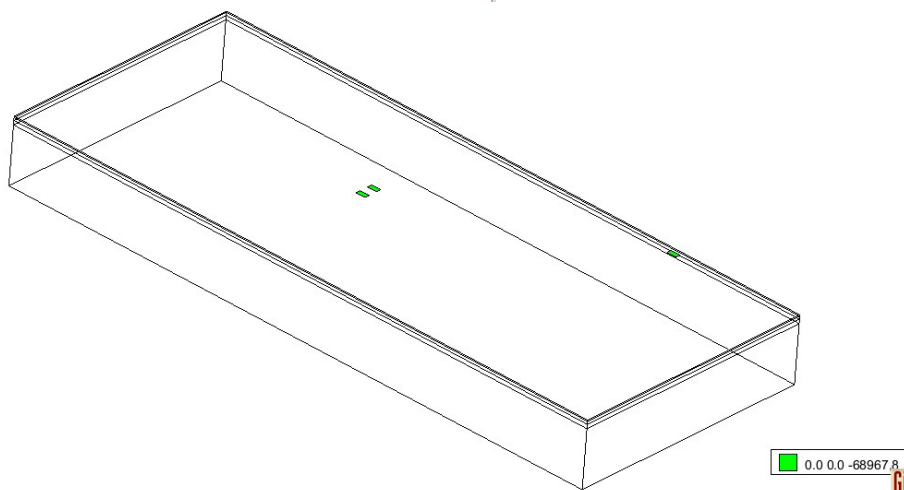
Fig. 1.3 Superficie restringida



J.2.2 Aplicación de las cargas

Se aplica una presión normal uniforme correspondiente a la división de la carga por rueda simple (25 725 kg) entre el área de contacto (0,373m²), sobre las 3 superficies de contacto de los neumáticos.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{25\,725\text{ kg}}{0,373\text{ m}^2} = 68967,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad (5.1)$$



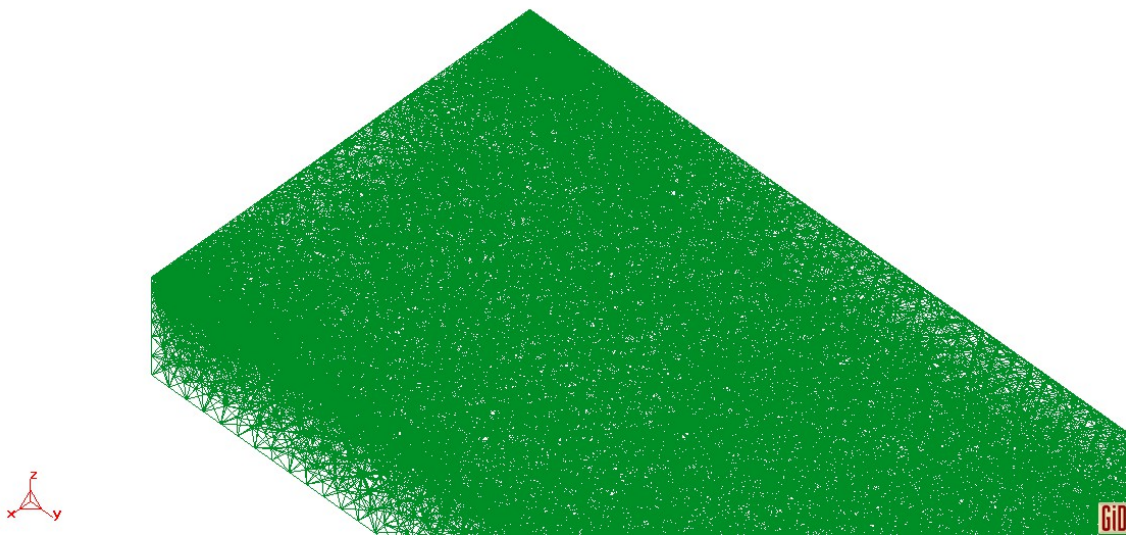
J.3 Malla

Para discretizar la estructura se crea una malla de elementos discretos a partir de la geometría definida. Esta malla será imprescindible para procesos posteriores como por ejemplo, para poder realizar el post procesado en el análisis de tensiones, deformaciones...

La malla generada es de tipo No-Estructurada. El tipo de elemento elegido es el triángulo.

Número de elementos =113509

Número de nodos=22789




Esta malla no es adecuada ya que si nos fijamos en la capa de rodadura solo tenemos 2 triángulos en todo el espesor. Lo ideal sería tener unos 4 elementos en la capa de rodadura.

Por esta razón pasamos al estudio en 2D.

Para sacar el módulo utilizaremos los valores correspondientes a la descarga para las cargas de 20kg y 10kg.

DESCARGA		
σ (Pa)	tiempo (s)	lectura μm
103937,9 (20kg)	0	3469
	30	3488
	60	3488
	90	3488
	120	3488
	150	3489
	180	3489
51968,9 (10kg)	210	3489
	240	3528
	270	3529
	300	3529
	330	3530
	360	3530

ANEXO L. Ficha mercado CE.

	ÁRIDOS PARA CAPAS GRANULARES Y CAPAS TRATADAS CON CONGLOMERANTES HIDRÁULICOS PARA SU USO EN CAPAS ESTRUCTURALES DE FIRMES GRANULOMETRÍA G_k 85	Código: D020-PR01-03 Revisión: 1.0. Aprobado por: A. Canaleta el: (pendiente) Página: 1 de 1
---	---	--

 0370			
TIRME, S.A. CTRA SÓLLER KM 8,2 07120 11 Inicio del Mercado CE año 2011 0370-CPD-1165			
EN 13242:2002+A1:2007 ÁRIDOS PARA CAPAS GRANULARES Y CAPAS TRATADAS CON CONGLOMERANTES HIDRÁULICOS PARA SU USO EN CAPAS ESTRUCTURALES DE FIRMES			
Forma de las partículas	Categoría	F ₁₂₀	
Tamaño de las partículas	Denominación (q/D)	0/20	
Granulometría	Categoría / Tolerancia	G _k 85	
Densidad de partículas sólidas	partículas < 4 mm	Valor declarado	1,7
	partículas > 4 mm	Valor declarado	2,7
Porcentaje de partículas trituradas	Categoría	C _{95/10}	
Limpieza	Contenido en finos	Categoría	f ₂
Resistencia a la fragmentación (Los Ángeles)	Categoría	LA ₄₀	
Absorción de agua	partículas < 4 mm	Valor declarado	5
	partículas > 4 mm	Valor declarado	5,5
Clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados	Categoría	N.A.	
Contenido químico	Azufre total	Categoría	S ₂
	Sulfatos solubles en ácido	Categoría	AS ₂
	Contenido en sustancias que alteran la velocidad del fraguado y endurecimiento del hormigón (ácido húmico, fólvico, ensayo mortero)	Cumple o no cumple el valor umbral	CUMPLE
Estabilidad en volumen	Retracción por secado	cumple o no cumple el valor umbral	N.P.D.
Durabilidad frente al hielo y deshielo del árido grueso	Categoría	N.P.D.	
Liberación de metales pesados por lixiviación	Valor umbral	Cumple según Orden 15 de febrero de 1996 sobre valorización de escorias, DOGC, num. 2181 13.03.1996	
Contenido en Compuestos Orgánicos Persistentes	Valor umbral	Cumple con los niveles permitidos para su reutilización de acuerdo con los Reglamentos (CE) nº 850/2004, nº 1195/2006, nº 172/2007, nº 756/2010	
Clasificación de los residuos según peligrosidad	Valor umbral	Residuo clasificado como no tóxico ni peligroso según Anexo III de la Directiva 2008/98/CE	

N.P.D.: Prestación No Determinada / N.A.: No Aplica

A...L...M

ANEXO M. Caracterización física y mecánicas de las escorias

Parámetro		Unidades	Aplicación	Tiempo maduración 0					Tiempo maduración 8		promedio
				Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 1	Muestra 2	
Equivalente de arena		%	Zahorras	46	42	75	47	63	52	57	54,57
Coeficiente de desgaste (Coeficiente de Los Angeles)			Zahorras	35	37	38	36	37	38	39	37
Caras de fractura			Zahorras	92	95,2	96,3	96,6	96,2	89	99,9	95,0
Índice de lajas			Zahorras	26,4	28,7	22,5	26,9	19,9	31,5	29,6	26,5
Azul de metileno		%	Zahorras	NA	NA	NA	0,49	NA	NA	NA	0,5
Límites Atterberg (PLASTICIDAD)			Z/T	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	
CBR	CBR 90%	%	Z/T	50	33	22	55	42	48	33	40
	CBR 95%	%	Z/T	61,5	70	49	85	60	75	58	66
	CBR 100%	%	Z/T	75	90	72	130	71	120	85	92
Proctor modificado	Máx densidad	g/ml	Z/T	1,82	1,79	1,76	1,84	1,8	1,84	1,73	1,80
	Humedad óptima	%	Z/T	13	14,1	14,9	11,7	14,5	12,8	13,9	14
Materia orgánica		%	Z/T	1,13	0,97	0,67	0,79	1,1	1,1	0,95	0,96
Sales solubles		%	Z/T	0,99	0,97	0,79	0,74	1,1	0,89	0,78	0,89
Granulometria mm	50	%	Z/T	100	100	100	100	100	100	96	99
	40	%	Z/T	97	100	100	100	100	100	96	99,0
	25	%	Z/T	91	98	97	98	98	98	95	96
	20	%	Z/T	89	96	96	97	96	94	92	94
	10	%	Z/T	70	76	75	73	73	75	70	73

	8	%	Z/T	62	69	67	66	63	69	63	66
	5	%	Z/T	48	54	50	51	48	52	47	50
	4	%	Z/T	45	50	45	45	44	46	43	45
	2	%	Z/T	34	38	33	37	34	36	32	35
	0,5	%	Z/T	15	14	7	19	11	13	13	13
	0,4	%	Z/T	12	11	5	11	8	11	10	10
	0,25	%	Z/T	8	7	3	7	4	8	7	6
	0,05	%	Z/T	4	3	1	2	1	3	3	2
	0,063	%	Z/T	4	3	1	2	1	3	2	2
Reactividad alcali-silice/ alcali-silicato					No reactiva	No reactiva			No reactiva		No reactiva
Humedad inicial		%	Z/T	15,99	13,42	15,4	13,42	13,74	9,87	17,27	14,2
Humedad final		%	Z/T	26,99	23,89	28,3	23,89	23,68	22,3	31,93	25,9
Hinchamiento máximo		%	Terraplenes	0	0	0,4			0	0	
Cambio potencial de volumen (24h)		%	Terraplenes	0,05	0	0,75	0,44	0	0	-0,01	0,2
Yesos NLT115/99 (%	Terraplenes	5,83	7,42	6,38	5,84		5,5	5,8	6,1
Azufre total en áridos									1,5	1,32	1,4
Sulfatos solubles en ácido									5,5	2,92	4,2
Densidad aparente		g/cm3	Zahorras						2,45	2,49	2,5
Absorción de agua		%	Zahorras						5,4	5,6	5,5
Coeficiente de limpieza									1,03	0,04	0,5

La designación del tipo de zahorra se hace en función del tamaño máximo nominal, que se define como la abertura del primer tamiz que retiene más de 10% en masa.

ANEXO N : Fotos de la empresa concesionaria TIRME S.A



Fig 1. Depósito de Seguridad para las Cenizas Cimentadas



Fig 2. Depósito de escorias



Fig 3. Incineradora



Fig 4. Interior de la Planta de escorias



Fig 5. Interior de la Planta de escorias



Fig 6. Interior de la Planta de escorias